

SCIENCE
JOURNAL

MODERN

ENGINEERING AND
INNOVATIVE
TECHNOLOGIES

'2023

ISSUE №30

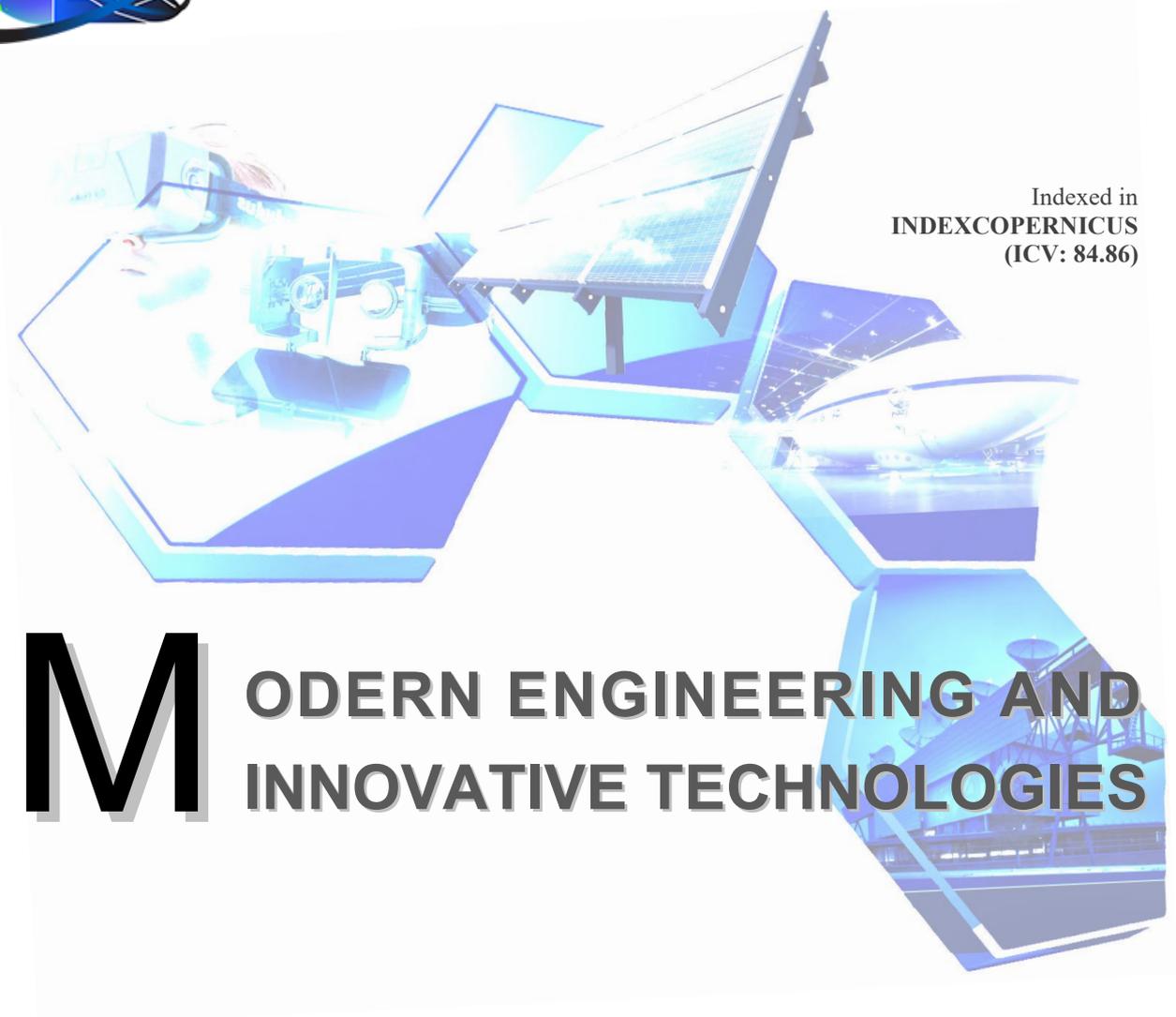
Part №1



International periodic scientific journal

—ONLINE

www.moderntechno.de



Indexed in
INDEXCOPERNICUS
(ICV: 84.86)

MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Issue №30
Part 1
December 2023

Published by:
Sergeieva&Co
Karlsruhe, Germany

Editor: Shibaev Alexander Grigoryevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician*

Scientific Secretary: Kuprienko Sergey, *PhD in technical sciences*

Editorial board: More than 300 doctors of science. Full list on page:

<https://www.moderntechno.de/index.php/swj/about/editorialTeam>

Expert Board of the journal: Full list on page:

<https://www.moderntechno.de/index.php/swj/expertteam>

The International Scientific Periodical Journal "**Modern engineering and innovative technologies**" has been published since 2017 and has gained considerable recognition among domestic and foreign researchers and scholars.

Periodicity of publication: Quarterly

The journal activity is driven by the following objectives:

- Broadcasting young researchers and scholars outcomes to wide scientific audience
- Fostering knowledge exchange in scientific community
- Promotion of the unification in scientific approach
- Creation of basis for innovation and new scientific approaches as well as discoveries in unknown domains

The journal purposefully acquaints the reader with the original research of authors in various fields of science, the best examples of scientific journalism.

Publications of the journal are intended for a wide readership - all those who love science. The materials published in the journal reflect current problems and affect the interests of the entire public.

Each article in the journal includes general information in English.

The journal is registered in IndexCopernicus, GoogleScholar.

UDC 08

LBC 94

DOI: 10.30890/2567-5273.2023-30

Published by:

Sergeieva&Co

Lußstr. 13

76227 Karlsruhe, Germany

e-mail: editor@moderntechno.de

site: www.moderntechno.de

Copyright

© Authors, scientific texts 2023



УДК 621.87

**ALGORITHMS FOR CONTROL OF TOWER CRANE STABILITY IN
CONDITIONS OF AIR SHOCK WAVES****АЛГОРИТМИ УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ БАШТОВОГО КРАНУ В УМОВАХ
ПОВІТРЯНИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ****Gorbatyuk Ie.V. / Горбатюк Є.В.***c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-8148-5323

Terentyev O.O. / Терентьев О.О.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-6995-1419

Rashkivskiy V.P. / Рашківський В.П.*c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-5369-6676

Bulavka O.O. / Булавка О.О.*Ph.D. degree / здобувач ступеня доктора філософії*

ORCID: 0000-0003-4119-174X

*Kyiv National University of Construction and Architecture,**Kyiv, Povitroflotsky Avenue, 31, 03037**Київський національний університет будівництва і архітектури,**Київ, Повітрофлотський проспект, 31, 03037*

Анотація. Робота баштових кранів на будівельних майданчиках залежить від дії динамічних навантажень. Однією складовою цих навантажень є швидкісний натиск повітряної ударної хвилі, що може призвести до зупинки кранів, а також можливі аварії або перекидання ведуть до простію та значних економічних витрат. В статті розроблений спосіб та реалізований в алгоритмах забезпечення стійкості баштового крану в умовах повітряних ударних хвиль, заснований на застосуванні методів нечіткої логіки. Наведена в роботі реалізація алгоритмів допоможе: контролювати і забезпечувати стійкість баштового крана в неробочому стані в умовах швидкісного натиску повітряної ударної хвилі; Контролювати стійкість вантажопідійомного крана при виконання розвантажувально-навантажувальних робіт у робочому стані в умовах повітряної ударної хвилі.

Ключові слова: баштовий кран, швидкісний натиск, повітряна ударна хвиля, алгоритм, метод нечіткої логіки, пакет нечіткого аналізу MATLAB Fuzzy Logic.

Вступ.

Одним із ключових механізмів на будівельних об'єктах є вантажопідіймальна техніка, зокрема, баштові крани. Баштові крани мають високу чутливість до вітрового натиску, тому безпека та продуктивність вантажно-розвантажувальних робіт, виконуваних ними, значною мірою залежить від впливів на металоконструкцію зовнішніх факторів, що обумовлюють, пов'язаних зі зміною динаміки вітрового натиску.

Поява небажаних динамічних навантажень вибухової хвилі може вплинути на стійкість баштового крану, що в свою чергу, призведе до виникнення аварійних ситуацій. Тому запобігання перекиданню є однією з основних цілей забезпечення безпеки роботи вантажопідійомних машин.

Мета. Розробити спосіб підвищення стійкості баштових кранів в робочому та неробочому станах в умовах повітряних ударних хвиль.



Алгоритми управління стійкістю баштового крана.

Запобігання перекиданню є однією з основних цілей забезпечення безпеки роботи вантажопідійомних машин. Збереження стійкості в умовах повітряних ударних хвиль в робочому і не робочому станах крана обумовлюється цілим рядом параметрів [1-3].

Системи захисту, що забезпечують безпеку ведення робіт, розглядаються так само і як пристрої з підвищеними інформаційними властивостями, що дозволяють машиністу крана орієнтуватися в навколишній обстановці, уникнути аварії, пошкодження вантажу і конструкцій, розташованих поблизу об'єкту.

Всі системи захисту побудовані на принципі визначення ступеня наближення значення поточного параметру навантаження до деякого граничного значення, що призводить до перекидання. Реалізація визначення цього значення в більшості систем безпеки базується на класичних логічних принципах порівняння еталонної математичної моделі з моделлю, отриманою в результаті обчислень функцій з вхідними змінними, що виражають параметри вантажопідійомної машини.

Пристрій безпеки стаціонарного баштового крана в умовах повітряних ударних хвиль у неробочому стані побудовано на принципі коригування та підтримання заданого паралельного положення стрілового пристрою відносно швидкісного натиску, по засобах управління апаратурою забезпечує стійкість з можливістю зміни жорсткості, впровадженій в кінематичну схему повороту башти.

У робочому стані основна функція пристрою безпеки це прогнозування збільшення швидкісного натиску вибухової хвилі і виведення відповідної інформації на блок візуальної індикації. У критичних ситуаціях при перевищенні максимально допустимого натиску для робочого стану крана, пристрій виконує функцію автоматичного коригування стійкості.

Для опису алгоритмів автоматичного керування стаціонарним баштовим краном у робочому та неробочому стані в умовах повітряних ударних хвиль, необхідно створити математичну модель з багато змінних, які визначають поточні параметри машини (положення стріли, швидкісний натиск та його напрямок тощо), що в свою чергу, ускладнює програмну частину пристрою безпеки. Рішення функціональних залежностей для всіх вхідних змінних математичної моделі, що описує швидкісний натиск, вимагатиме велику обчислювальну потужність, що ускладнює апаратну частину пристрою.

У роботі пропонується використовувати для реалізації функцій автоматичного керування стаціонарним баштовим краном у період дії швидкісного натиску повітряної ударної хвилі, систему, побудовану на алгоритмах нечіткої логіки. Це пов'язано з тим, що реалізація функцій безпеки не потребує обчислення точних значень вхідних і вихідних параметрів.

Використання нечіткої логіки в системах керування дозволяє описувати нечіткі поняття, нечіткі функції і робити нечіткі висновки. Використання нечіткого керування виправдано, коли процеси є занадто складними для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів. Наявність математичних



засобів відображення нечіткості вихідної інформації дозволяє побудувати модель, адекватну реальності.

На підставі досліджень стійкості стаціонарного баштового крана і питань, розглянутих раніше, розробляється автоматизований комплекс, який повинен вирішувати такі завдання:

1. Контролювати і забезпечувати стійкість баштового крана в неробочому стані в умовах швидкісного натиску повітряної ударної хвилі;

2. Контролювати стійкість вантажопідйомного крана при виконання розвантажувально-навантажувальних робіт у робочому стані в умовах повітряної ударної хвилі.

Для проектування системи автоматичного керування стійкістю стаціонарного баштового крана скористаємося програмним комплексом MATLAB пакетом нечіткого аналізу Fuzzy Logic [4, 5].

При швидкісному натиску повітряної ударної хвилі дуже важлива швидкодія системи забезпечення стійкості, що забезпечується системою управління активним допоміжним приводом поворотної платформи крана. Для цього в апарат нечіткої логіки даної системи управління вводиться лінгвістична змінна «прискорення тиску», що виконує прогностичну функцію, що в умовах різкої зміни швидкісного натиску та дозволяє скоригувати положення стріли крана до того, як коефіцієнт запасу стійкості прийме критичне значення.

Впровадження допоміжного приводу поворотної платформи крана дозволяє забезпечити максимум швидкодії при виникненні небезпечних прискорень за рахунок того, що кран приймає стійке положення з максимально можливою швидкістю. Дослідження цього процесу проведено в програмному пакеті Simulink середовища MATLAB за допомогою синтезу системи автоматичного регулювання приводу поворотної платформи, а вхідні сигнали для моделюваної системи керування формуються за допомогою системи непарних правил [6, 7].

Вхідними лінгвістичними змінними для цієї системи є «прискорення швидкісного натиску», «швидкісний натиск», і «положення стріли», вихідними «команда управління допоміжним приводом», «стан гідромумфти». При активізації цієї системи на блок індикації кранівнику надходить попереджувальний сигнал про можливої небезпеки.

Лінгвістичною змінною «прискорення швидкісного натиску» будуть відповідати два терма - «norma», «danger» належать нечіткій множині «uskorenie» (рисунок 1), зі значеннями $[0,5 \ 1]$, $[0,5 \ 2,5]$ з координатами максимуму 1, 2,5 м/с і коефіцієнтами концентрації відповідно 0,8 і 1,7.

Лінгвістичною змінною «швидкісний натиск» будуть відповідати два терма - «norma», «danger» належать нечіткій множині «skorost» (рисунок 2), зі значеннями $[0,5 \ 5]$, $[0,5 \ 10]$ з координатами максимуму 5, 10 м/с і коефіцієнтами концентрації відповідно 1,5 і 5,2.

Лінгвістичною змінною «положення стріли» відповідають три терма - «0-10», «10-50», «50-90» належать безлічі «polojenie» з значеннями функціональної приналежності - $[10 \ 0]$; $[15 \ 45]$; $[15 \ 90]$ (рисунок 3), де 0, 45 і 90 - значення кута, виражене в градусах, а 10, 15 і 15 - коефіцієнти концентрації.

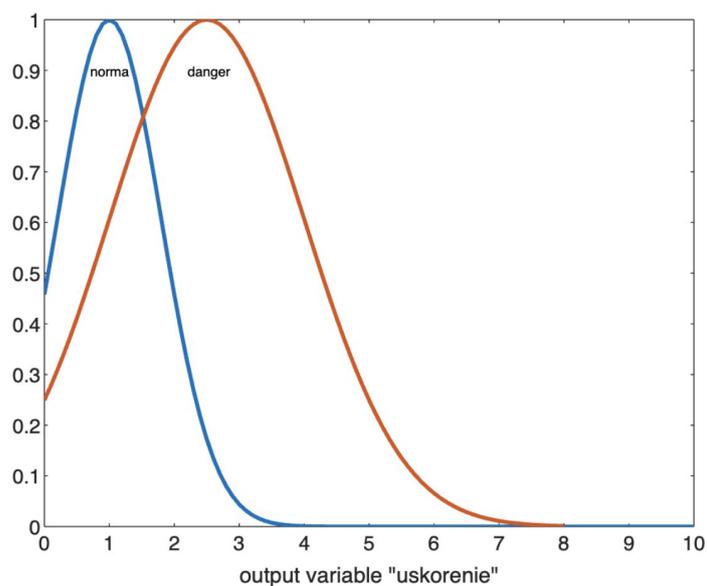


Рисунок 1 - Нечітка множина «uskorenie»

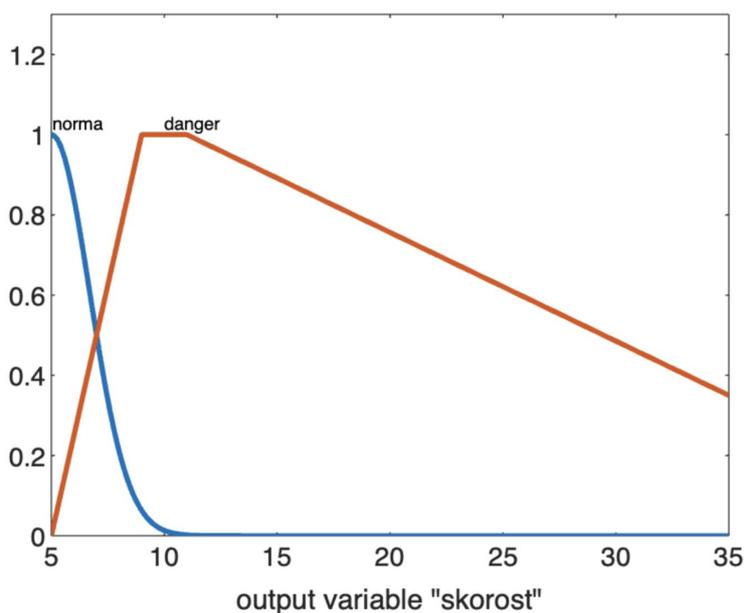


Рисунок 2 - Нечітка множина «skorost»

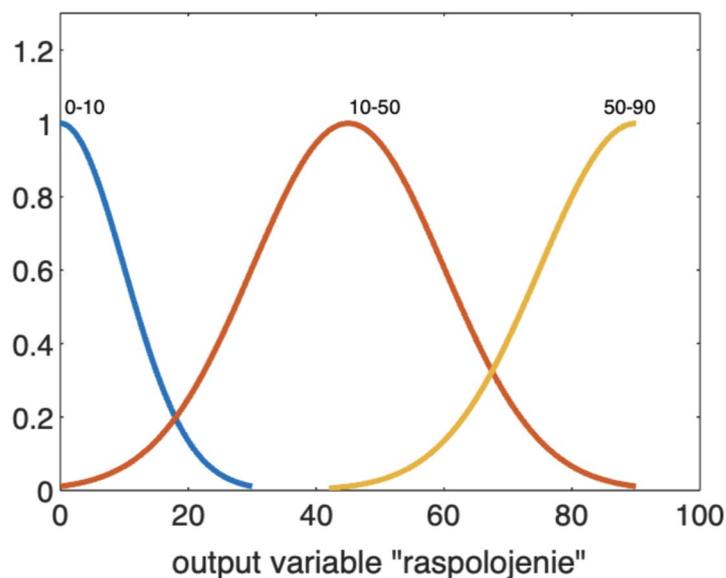


Рисунок 3 - Нечітка множина лінгвістичної змінної «положення стріли»



Вихідні лінгвістичні змінні формуватимуть виконуючі сигнали управління обладнанням допоміжного приводу поворотної платформи. Це вихідні лінгвістичні змінні «команда управління двигуном» і «команда управління гідромуфтою». Лінгвістична змінна «команда управління двигуном» відповідають терми «вкл» і «викл», а лінгвістичною змінною «команда управління гідромуфтою» - терми «відкрита», «закрита» (рисунок 4).

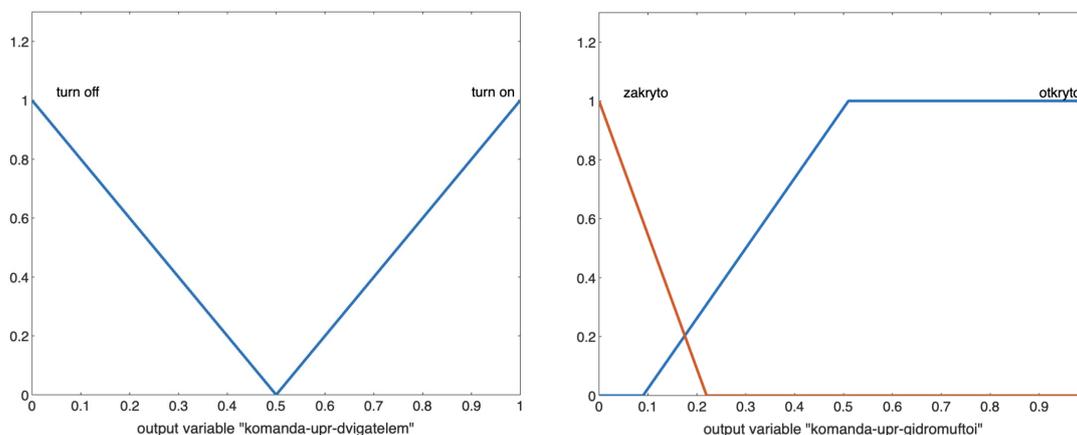


Рисунок 4 - Опис вихідних лінгвістичних змінних

Взаємодія між вхідними та вихідними змінними описується системою певних логічних правил, представлених на рисунку 5

- 1 If (uskorenie is danger) and fskorost e danger) and (pokszhefs is 0-10) then (komanda-upr-dvigaieiem is vy)(komanda-upr-g>dromuftoi is otkryto) (1)
- 2 If (uskorenie is danger) and fskorost e danger) and (pokszhefs is 10-50) then (komanda-upr-dvigaieiem is vy)(komanda-upr-g>dromuftoi is otkryto) (1)
- 3 If (uskoreme is danger) and (skorost is danger) and (polozheme is 50-90) then (komanda-upr-dvigatelem s vkl)fkomanda-upr-gidromuftoi is otkryto) (1)
- 4 If (uskorenie is norma) and (skorost is norma) and (polozheme is £0-90) then (komanda-upr-dvigatelem is vyklKkomanda-upr-gidronuftoiiis zakryto)(1)
- 5 If (uskorenie is danger) and (skorost is norma) and (polozhenie is 10-50) then (komanda-upr-dvigatelem is vkl)(komanda-upr-gidromuftoi is zakryto) (1)

Рисунок 5 - Система логічного взаємозв'язку між вхідними та вихідними лінгвістичні змінні

Для візуалізації нечітких правил входів - виходів представимо поверхню нечіткої бази знань (рисунок 6).

Між системами керування на нечіткій логіці основним приводом поворотної платформи баштового крана і допоміжним приводом існує і чітке логічне правило - опис стану гідромуфти допоміжного приводу приймає значення керуючого сигналу «відкрито», тільки якщо стан гідромуфти основного приводу описано значенням «закрито». Пов'язано це з тим, що два приводи встановлені в системі паралельно і включення одного в роботу виключає включення іншого. Цей логічний взаємозв'язок реалізується за допомогою реле, працюючого як ключ, що вдосконалено у функціональній схемі системи керування, змодельоване в програмному комплексі «Simulink» як блок «Switch».

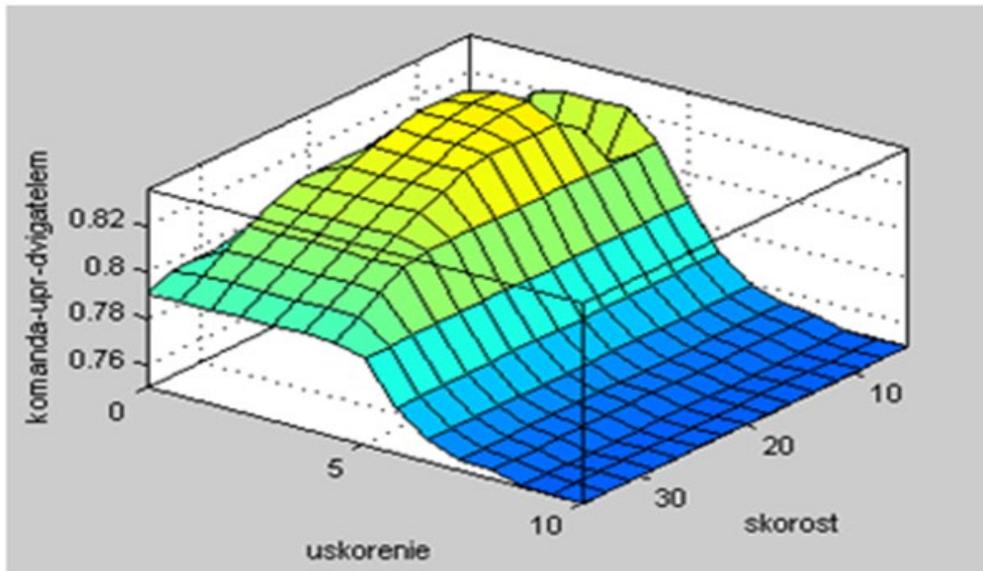


Рисунок 6 - Поверхня бази знань входи – виходи

Висновки

1. Спосіб забезпечення стійкості стаціонарного баштового крана в умовах повітряних ударних хвиль заснований на принципі активного коригування та підтримки заданого положення стріли крана щодо швидкісного натиску з попереджуючих керуючих сигналів механізми, що забезпечують поворот стріли крана та збереження стійкості до виникнення критичного моменту.

2. Розроблений спосіб реалізований у алгоритмах забезпечення стійкості стаціонарного баштового крана при швидкісному натиску повітряної ударної хвилі заснованих на застосування методів нечіткої логіки.

3. Між системами керування на нечіткій логіці основним приводом поворотної платформи баштового крана та допоміжним приводом існує чітке логічне правило - опис стану гідромуфти допоміжного приводу набуває значення керуючого сигналу “відкрито”, тільки якщо стан гідромуфти основного приводу описано значенням “закрито”.

Література:

1. Михайлов Є.П. Конспект лекцій «Сучасні тенденції створення автоматизованих систем управління вантажопідйомних машин». Державний університет «Одеська Політехніка», Одеса 2021, 89с.

2. Волянюк В., Горбатюк Є., Міщук Д. Визначення динамічних навантажень в механізмі підймання кранів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2022. Вип. 100. С. 12–22. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2022.100.0201>

3. Determination of dynamic loads in the crane lifting mechanism / Volianiuk V.O., Gorbatiuk Ie.V., Terentyev A.A., Bulavka O.O. Modern engineering and innovative technologies. Issue №22. Part 1. August 2022. P. 3-14. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2022-22-01-006>.

4. Нейромережеві технології в системах управління: підручник / Кузнецов Б.І., Василюк Т.Ю., Нікітіна Т.Б., Коломиєць В.В., Варфоломійєв О.О.



Укр. інж.-пед. акад. Харків: УПА, 2014. 232 с.

5. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. Versions. The MathWorks, Inc, 1999. 235p.

6. Черній Д.І., Головенко А.Д. Технологія експрес-прогнозу нестационарних нелінійних аераційних та гідрологічних процесів // International Workshop "PROBLEMS OF DECISION MAKING UNDER UNCERTAINTIES" (PDMU2008), Abstracts, September 22-27, 2008. Crimea (Novy Svit), Ukraine, pp.127-128.

7. Черній Д.І., Довгий С.О., Головенко О.Д. Особливості моделювання аеродинаміки висотної забудови та будівельних конструкцій // Праці XII Міжнародного симпозіуму МДОЗМФ "2005. Херсон-2005. С. 375- 377.

***Abstract.** The operation of tower cranes on construction sites depends on the action of dynamic loads. One component of these loads is the speed pressure of the air shock wave, which can lead to the shutdown of cranes, as well as possible accidents or capsizing lead to downtime and significant economic costs. The article developed a method and implemented in algorithms to ensure the stability of the tower crane in conditions of air shock waves, based on the use of methods of fuzzy logic. The implementation of the algorithms given in the work will help: control and ensure the stability of the tower crane in a non-operating state in the conditions of the high-speed pressure of the air shock wave; Monitor the stability of the lifting crane during unloading and loading operations in working condition under air shock wave conditions.*

***Key words:** tower crane, high-speed pressure, air shock wave, algorithm, fuzzy logic method, Fuzzy Logic MATLAB Fuzzy analysis package.*

Стаття відправлена: 20/12/2023

© Горбатюк Є.В., Терентьев О.О., Рашківський В.П., Булавка О.О.



UDC 681.5

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Ashhepkova N.S. / Ащепкова Н.С.

s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-1870-1062

Oles Honchar Dnipro National University,

Dnipro, av. Gagarin 72, 49010

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара,

Дніпро, пр. Гагарина 72, 49010

Koshevoy N.D. / Кошовий М.Д.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф..

ORCID: 0000-0001-9465-4467

National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute",

Kharkov, st. Chkalov 17, 61070

Національний аерокосмічний університет "ХАІ" ім. М. Жуковського,

Харків, вул. Чкалова 17, 61070

Анотація. У статті розглянуто автономний мобільний робот з маніпулятором. Для дослідження динаміки системи застосована модель «носій – перенесене тіло». Переміщення маніпулятора відносно платформи надають недиагональність та нестационарність тензору інерції системи. Об'єкт дослідження - багатозв'язна система керування автономного мобільного робота з маніпулятором. Перехресний зв'язок каналів здійснюється за рахунок фізичних властивостей об'єкту керування. Мета дослідження – аналіз стійкості багатозв'язної системи керування. Початковими даними для аналізу стійкості є структурна схема та передаточні функції незмінної частини сепаратних каналів та перехресних зв'язків в об'єкті керування. Оцінку стійкості проведено за коренями характеристичного рівняння та узагальненим методом Найквіста. За заданих початкових умовах багатозв'язна система керування перебуватиме на межі стійкості.

Ключові слова: автономний мобільний робот, маніпулятор, багатозв'язної системи керування.

Вступ.

Сучасні мобільні роботи діють за допомогою автоматизованого керування з дистанційною участю людини-оператора. В такому випадку, робот виконує завдання самостійно, але оператор знаходиться у віддаленому місці і може контролювати його дії. Це особливо корисно в небезпечних або важкодоступних місцях, де людина не може прямо керувати роботом, але може дати необхідні команди та вести нагляд. В роботах [1, 2] підкреслюється важливість застосування модульного принципу складання конструкцій автономних мобільних роботів (АМР). Наявність змінного обладнання (маніпулятор, щуп, бур, ківш і т.п.) та інструменту поширює галузь застосування АМР [3, 4]. При експлуатації АМР ці елементи рухаються відносно платформи, змінюючи геометрію мас системи.

Завдання системи керування - забезпечення мінімального відхилення центру мас платформи АМР від заданої траєкторії. Керуючі моменти



виконавчих приводів направлені вздовж осей системи координат зв'язаної з платформою АМР [5].

При здійсненні технологічних операцій з вибухонебезпечними об'єктами застосовують дистанційно керовані АМР з маніпулятором [1–3]. АМР з маніпулятором є складною механічною системою “носій – перенесене тіло”: ланки маніпулятора – перенесені тіла, платформа – несуче тіло. При відносному русі маніпулятора головні центральні осі інерції механічної системи не спрямовані з осями системи координат зв'язаної з платформою АМР. Значення відцентрових моментів інерції системи при відносному русі маніпулятора сумірні значенням осьових моментів інерції системи, навіть якщо маса рухомих елементів конструкції становить 10% маси платформи АМР [6]. Переміщення маніпулятора відносно платформи надають недиагональність та нестационарність тензору інерції системи та обумовлюють перехресний зв'язок каналів керування [7, 8].

При здійсненні технологічних операцій з вибухонебезпечними об'єктами доцільно застосовувати узгоджені дії групи АМР [9-11]. На оперативному рівні система керування для кожного АМР розв'язує різноманітні завдання [9]:

- наявність робота у заданій точці робочого простору в означений термін,
- рух вздовж заданого маршруту,
- об'їзд перешкод і т.д.

На стратегічному рівні система керування має узгоджувати дії всіх АМР групи. Наявність різноманітного навісного обладнання АМР в межах групи та використання коректних алгоритмів керування дозволяє розширити область застосування групи АМР. Недоліком існуючих методів керування групою АМР є неузгодження алгоритмів керування з кінематичними обмеженнями та динамікою окремих роботів [10]. Слід зазначити, що помилка в керуванні одного АМР може привести до знищення групи [11].

Актуальність роботи полягає в необхідності забезпечення керованості АМР при здійсненні технологічних операцій з вибухонебезпечними об'єктами.

Мета дослідження – аналіз стійкості багатозв'язної системи керування автономного мобільного робота з маніпулятором. Для досягнення цієї мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- проаналізувати стійкість багатозв'язної системи керування,
- визначити коливальну межу стійкості багатозв'язної системи керування.

Об'єктом дослідження є система керування автономного мобільного робота оснащеного антропоморфним маніпулятором з чотирма ступенями рухливості.

Матеріали та методи.

Конструкція АМР з маніпулятором (рис. 1) складається з повнопривідної 4 – колісної платформи АМР, та антропоморфного маніпулятора складеного з кільця, що обертається навколо вертикальної вісі, та стрижневих ланок – руки, з'єднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу.

Цикл роботи АМР з маніпулятором можна розділити на декілька режимів:

- 1) рух платформи АМР вздовж заданої траєкторії з зафіксованим маніпулятором;



- 2) виконання маніпулятором технологічних операцій при нерухомій платформі;
- 3) переміщення платформи АМР з рухливим маніпулятором.

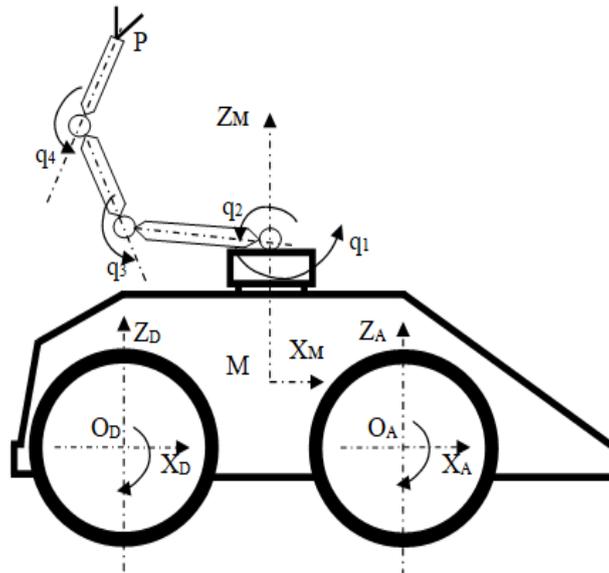


Рисунок 1 - Схема конструкції автономного мобільного роботу з маніпулятором

Джерело: [7]

При реалізації першого режиму руху АМР з маніпулятором можна вважати чотириколісним повнопривідним візком. Динаміку та керованість такого візку детально досліджено у [12].

При другому та третьому режимі АМР можна розглядати як антропоморфний маніпулятор на рухливій основі. Виконання маніпулятором технологічних операцій при нерухомій платформі обумовлює лінійні та кутові збурення відносно положення рівноваги механічної системи.

При реалізації третього режиму керуючі впливи – моменти прикладені до кожного колеса обумовлюють відхилення маніпулятора від розрахункового положення в наслідок недіагональності тензору інерції.

Кількість керуючих впливів: для першого режиму – чотири (на кожне колесо); для другого режиму – чотири (на кожен узагальнену координату маніпулятора); для третього режиму – вісім каналів.

Перехресний зв'язок каналів системи керування для АМР з маніпулятором обумовлений фізичними властивостями об'єкту керування. Особливості динаміки та методи аналізу й синтезу таких систем керування наведено у [13].

Дослідження стійкості багатозв'язної системи керування (БСК) здійснено за структурною схемою (рис. 2).

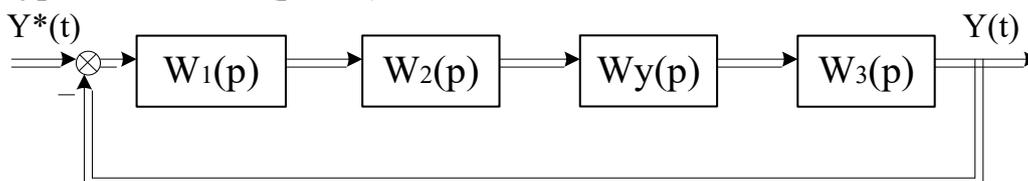


Рисунок 2 - Структурна схема багатозв'язної системи керування

Авторська розробка



Перехресні зв'язки каналів керування зосереджені у багатовимірному об'єкті керування.

Передаточні матриці (ПМ) лінійних ланок у складі чотирьохвимірної БСК мають вигляд:

$$\begin{aligned} W_1(p) &= \text{diag}\{W_{p1}(p); W_{p2}(p); W_{p3}(p); W_{p4}(p)\}; \\ W_2(p) &= \text{diag}\{W_{01}(p); W_{02}(p); W_{03}(p); W_{04}(p)\}; \\ W_3(p) &= \text{diag}\{1/p; 1/p; 1/p; 1/p\}, \end{aligned}$$

де $W_{pi}(p)$ – передаточні функції i -го сепаратного регулятора; $i = 1, \dots, 4$;

$$W_{0i}(p) = \frac{K_i}{(1 + pT_{ai})(1 + pT_{bi})} - \text{передаточні функції незмінної частини } i\text{-го}$$

сепаратного каналу; $W_k(p) = [E + W_x(p)]$ – ПМ компенсатора із прямими перехресними зв'язками. Тут

$$W_x(p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & W_{x4}(p) \\ 0 & 0 & W_{x3}(p) & 0 \\ 0 & W_{x2}(p) & 0 & 0 \\ W_{x1}(p) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а $W_{x1}(p)$, $W_{x2}(p)$, $W_{x3}(p)$ і $W_{x4}(p)$ – передаточні функції прямих (або зворотних) перехресних зв'язків у складі послідовного компенсатора, що забезпечує властивість автономності каналів регулювання;

$$W_y(p) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & W_{y4}(p) \\ 1 & 1 & W_{y3}(p) & 1 \\ 1 & W_{y2}(p) & 1 & 1 \\ W_{y1}(p) & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

де $W_{yi}(p) = \frac{K_{yi}}{1 + pT_{yi}}$ – передаточні функції перехресних зв'язків в об'єкті керування.

Для визначеності, як приклад, розглянемо БСК з початковими даними наведеними у табл.1.

Таблиця 1. Коефіцієнти передаточних функцій

Номер каналу	Коефіцієнти незмінної частини i -го сепаратного каналу			Коефіцієнти перехресних зв'язків i -го сепаратного каналу	
	K_i, c^{-1}	T_{ai}, c	T_{bi}, c	K_{yi}, c^{-1}	T_{yi}, c
1	125	0,07	0,01	-15	0,028
2	135	0,11	0,009	10	0,0135
3	110	0,06	0,035	-12	0,024
4	120	0,15	0,032	10	0,048

Усі розрахунки проведемо з застосуванням пакету прикладних програм MathCad.



Результати досліджень та обговорення

Стійкість багатозв'язної системи керування. Аналіз динаміки АМР з маніпулятором [6] доводить, що перехресний зв'язок між каналами керування обумовлює відхилення в площинах перпендикулярних напрямку руху. Відхилення від усталеного вертикального положення може призвести до падіння і втрати функціоналу АМР.

Запишемо передавальну матрицю розімкнутої системи (рис. 2)

$$W(p) = W_3(p)W_y(p)W_2(p)W_1(p). \tag{1}$$

Вираз для одержання характеристичного рівняння

$$\det [E+W(p)] = H(p) = 0, \tag{2}$$

де $[E+W(p)]$ – матриця обернених різниць. Дробово-раціональна функція $H(p)$ містить у чисельнику характеристичний поліном $\varphi_3(p)$ для замкнутої БСК, а в знаменнику – характеристичний поліном $\varphi_p(p)$ для розімкнутої БСК

$$H(p) = \varphi_3(p)/\varphi_p(p). \tag{3}$$

За допомогою програмного пакета MathCad знайдемо характеристичний поліном розімкнутої БСК. Зрівняємо одержаний поліном до нуля й одержимо корені характеристичного рівняння розімкнутої БСК

$$p_1 = -37,8; p_2 = -180; p_3 = 0; p_4 = 0; p_5 = -114 - 47,9j; p_6 = -114 + 47,9j; \\ p_7 = -2,17 - 0,102j; p_8 = -2,17 + 0,102j; p_9 = -64,7 - 13,8j; p_{10} = -64,7 + 13,8j.$$

За результатами розрахунку, робимо висновок, що розімкнута БСК знаходиться на аперіодичній межі стійкості.

Дослідження стійкості замкнутої БСК проведено за узагальненим критерієм Найквіста із застосуванням $H(p)$. Замінімо $p = j\omega$ і подамо визначник матриці обернених різниць у вигляді суми дійсної й уявної частин

$$H(j\omega) = |E + W(j\omega)| = P(\omega) + jQ(\omega).$$

Побудуємо узагальнений годограф Найквіста за допомогою програмного пакета MathCad (рис. 3).

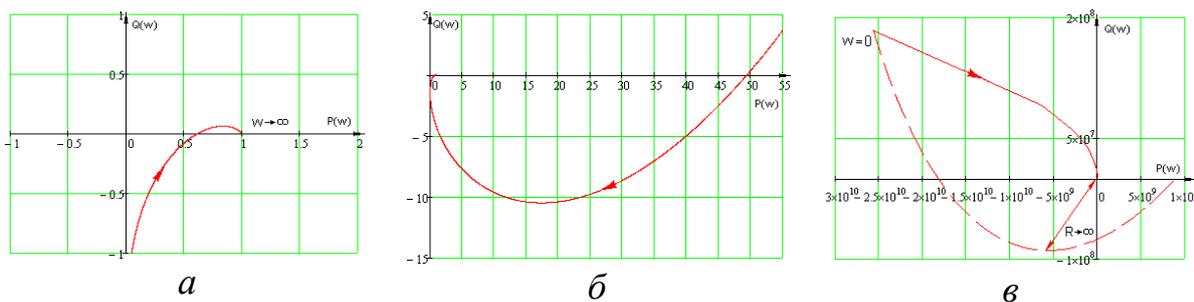


Рисунок 3 - Узагальнений годограф Найквіста

Авторська розробка

Якщо розімкнута система знаходиться на аперіодичній межі стійкості, то для стійкості замкнутої БСК необхідно й достатньо, щоб узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіуса, не охоплював точку з координатами $(0; j0)$. Оскільки узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіуса, охоплює точку з координатами $(0; j0)$ (рис. 3, в), то замкнута БСК нестійка.



Коливальна межа стійкості. За допомогою узагальненого годографа Найквіста можна підібрати таку пару значень параметрів K_1 і K_2 , за яких БСК знаходиться на коливальній межі стійкості. Для нашого розрахункового прикладу: $K_1=0,262$; $K_2=135$.

Зобразимо відкоректований годограф Найквіста для системи зі знайденими коефіцієнтами в області високих частот (рис. 4).

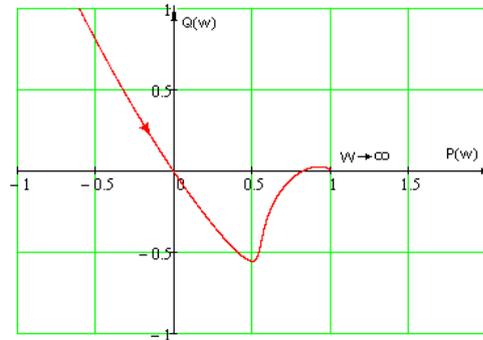


Рисунок 4 - Відкоректований годограф Найквіста

Авторська розробка

Перевіримо правильність обчислених значень моделюванням БСК. За допомогою програмного пакета MathCad побудуємо графіки перехідних процесів $h_1(t)$ та $h_2(t)$ (рис. 5).

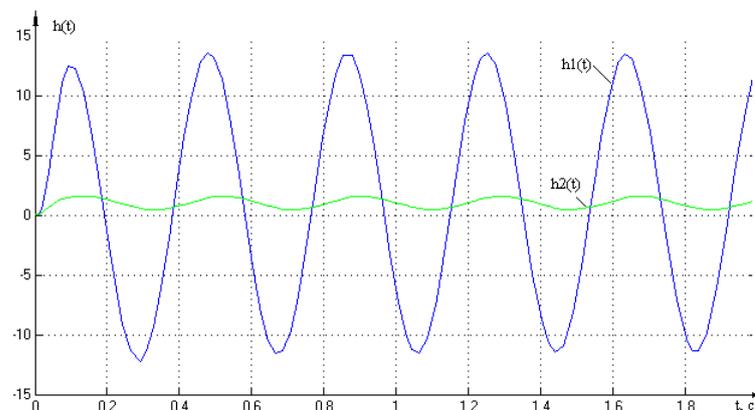


Рисунок 5 - Графіки перехідних процесів.

Авторська розробка

Графіки перехідних характеристик (рис.5) являють собою незгасаючі коливання, отже, за заданих параметрів система перебуватиме на межі стійкості.

Висновки.

У роботі представлено результати дослідження стійкості багатозв'язної системи керування. Початковими даними для аналізу стійкості є структурна схема та передаточні функції незмінної частини сепаратних каналів та перехресних зв'язків в об'єкті керування. Оцінку стійкості проведено за коренями характеристичного рівняння та узагальненим методом Найквіста. За заданих параметрів система перебуватиме на межі стійкості.



Подальші дослідження і синтез багатозв'язної системи керування мобільного робота з маніпулятором дозволить підвищити його живучість і ефективність за умов автономної роботи. Оскільки мобільний робот з маніпулятором є прикладом класу об'єктів «автономний мобільний робот змінюваної конфігурації», то отримані результати можна застосовувати до всіх об'єктів цього класу.

Література

1. Лапота, А.В., Спасский, Б.А. (2020). Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения. Робототехника и техническая кибернетика, № 8(1). – С. 5 – 17. doi: 10.31776/RTCJ.8101
2. Цариченко, С.Г., Антохин, Е.А., Чернова, П.Д. и Дементей, В.П. (2020). Состояние и проблемы стандартизации и унификации наземных робототехнических комплексов военного назначения. Робототехника и техническая кибернетика, № 8 (1) . – С. 18–23. doi: 10.31776/RTCJ.8102.
3. Ермолов, И.Л., Хрипунов, С.П., Благодарящев, И.В. и Хрипунов, С.С. (2017). Типовая структурно-функциональная схема робототехнических комплексов военного назначения. Информационно-измерительные и управляющие системы, № 15 (6). –С. 4-9. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29712433>
4. Kurfess, T.R. (2018). Robotics and Automation Handbook; CRC Press: Boca Raton, FL, USA; ISBN 978-1-4200-3973-3.
5. Barrett, L. (2020). Handbook of Robotics; Willford Press: Forest Hills, NY, USA; ISBN 978-1-68285-776-2.
6. Ashhepkova, N.S. (2022). Analysis of inertia tensor of autonomous mobile robot. Technology Audit and Production Reserves. – Kharkiv. – February, 2022. – Vol.63. № 1-2. – P. 24 – 34. doi: 10.30890/2567-5273/.2021-15-02-066
7. Ashhepkova, N.S. (2023). Construction of a mathematical model of the dynamics of an autonomous mobile robot of variable configuration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, – Kharkiv. – December, 2022. –Vol. 6 №7 (120). – P. 30 – 44. doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269840
8. Zbrutsky, A., Koshevoy, N and Ashhepkova, N. Analysis of the Dynamics and Controllability of Autonomous Mobile Robot with a Manipulator/ In “Recent Developments in Automatic Control System”. – River Publishers, 2022 – P. 121 – 144. ISBN 9788770226745
9. Rubtsov, V.I., Mashkov, K.J. and Konovalov, K.V. (2021) Multi-Level Control System for a Intelligent Robot That is Part of a Group. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. Vol.22 (1), pp. 610-615. doi: 10.17587/mau.22.610-615.
10. Kurochkin, S.Yu. and Tachkov A.A. (2021) Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots (a Review), Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. Vol.22 (6), pp. 304-315. doi: 10.17587/mau.22.304-315.
11. Kenzin, M., Bychkov, I. and Maksimkin, N. “Coordinated Recharging of Heterogeneous Mobile Robot Teams during Continuous large Scale Missions”, 2020 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2020, pp. 745-750, doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263974.



12. Мартынов Ю. Г. Управление движением мобильных колесных роботов / Ю. Г. Мартынов // *Фундамент. и прикл. матем.*, – Москва „МГУ”. – Т.11., Вып.8. – 2005. – С.29–80.

13. Зырянов Г. В. Системы управления многосвязными объектами: учеб. пособие / Г. В. Зырянов // – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 112 с.

References

1. Lapota, A., Spassky, B. (2020). Mobile ground-based robot systems for professional use. *Robotics and Technical Cybernetics*, № 8(1). – P. 5 – 17. doi: 10.31776/RTCJ.8101.

2. Tsarichenko, S., Antokhin, E., Chernova, P. and Demeney, V. (2020). The state and problems of standardization and unification of military ground robot systems. *Robotics and Technical Cybernetics*, № 8(1). – P. 18–23. doi: 10.31776/RTCJ.8102.

3. Ermolov, I.L., Khrypunov, S.P., Dzhachashchev, I.V. and Khrypunov, S.S. (2017). A typical structural and functional diagram of robotic complexes for military use. *Information-measuring and control systems*, № 15 (6). – P. 4 – 9. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29712433>.

4. Kurfess, T.R. (2018). *Robotics and Automation Handbook*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA; ISBN 978-1-4200-3973-3.

5. Barrett, L. (2020). *Handbook of Robotics*; Willford Press: Forest Hills, NY, USA; ISBN 978-1-68285-776-2.

6. Ashhepkova, N.S. (2022). Analysis of inertia tensor of autonomous mobile robot. *Technology Audit and Production Reserves*. – Kharkiv. – February, 2022. – Vol.63. № 1-2. – P. 24 – 34. doi: 10.30890/2567-5273/2021-15-02-066

7. Ashhepkova, N.S. (2023). Construction of a mathematical model of the dynamics of an autonomous mobile robot of variable configuration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, – Kharkiv. – December, 2022. –Vol. 6 №7 (120). – P. 30 – 44. doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269840

8. Zbrutsky, A., Koshevoy, N and Ashhepkova, N. (2022) Analysis of the Dynamics and Controllability of Autonomous Mobile Robot with a Manipulator/ In “Recent Developments in Automatic Control System”. – River Publishers, 2022 – P. 121 – 144. ISBN 9788770226745

9. Rubtsov, V.I., Mashkov, K.J. and Konovalov, K.V. (2021) Multi-Level Control System for a Intelligent Robot That is Part of a Group. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. Vol.22 (1), P. 610-615. doi: 10.17587/mau.22.610-615.

10. Kurochkin, S.Yu. and Tachkov A.A. (2021) Methods of Formation Control for a Group of Mobile Robots (a Review). *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. Vol.22 (6), P. 304-315. doi: 10.17587/mau.22.304-315.

11. Kenzin, M., Bychkov, I. and Maksimkin, N. (2020) Coordinated Recharging of Heterogeneous Mobile Robot Teams during Continuous large Scale Missions. *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 2020, P. 745-750, doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263974.

12. Martynov Yu. G. Control of the movement of mobile wheeled robots, *Fundamental and applied mathematics*, – Moscow, „MSU”. – Issue.11., Vol.8. – 2005. – P. 29–80.

13. Zyryanov G.V. (2010) Control systems for multiconnected objects: textbook. manual; Chelyabinsk: SUSU Publishing Center – 112 p.

Abstract. *The article deals with an autonomous mobile robot with a manipulator. To study the dynamics of the system, the "carrier - transferred body" model is applied. The movement of the manipulator relative to the platform provides off-diagonality and non-stationarity to the inertia tensor of the system. The object of research is a multi-link control system of an autonomous mobile robot with a manipulator. Cross communication of channels is carried out due to the physical properties of the control object. The purpose of the study is to analyze the stability of a multi-link*



control system. The initial data for the stability analysis are the structural diagram and the transfer functions of the constant part of the separate channels and cross-connections in the control object. Stability was assessed using the roots of the characteristic equation and the generalized Nyquist method. Under the given initial conditions, the multi-link control system will be at the limit of stability.

Keywords: autonomous mobile robot, manipulator, multi-link control system.

*Стаття підготовлена в рамках роботи за д/б темами:
№ 0122 U 001326 «Науково- методичне забезпечення прикладних
досліджень в механіці механотронних систем», 2022-2024 р.р.
№ 0121 U 108950 «Розробка вимірювальних
перетворювачів з цифровим виходом», 2021-2023 р.р.*

Стаття відправлена: 17.12.2023 г.
© Ащепкова Н.С., Кошовий М.Д.

*The article was prepared as part of the work on the following topics:
No. 0122 U 001326 "Scientific and methodological support of
applied research in the mechanics of mechatronic systems", 2022-2024.
No. 0121 U 108950 "Development of measuring converters
with digital output", 2021-2023*

Article sent: 17.12.2023 г.
© Ashchepkova N.S., Koshevoy N.D.



UDC 629.7.615.3

KINEMATIC ANALYSIS OF THE MANIPULATOR

КІНЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ МАНІПУЛЯТОРА

Ashhepkova N.S. /Ащепкова Н.С.

с.т.с., аs.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-1870-1062

Opshitosh N.O. /Опшитош Н.О.

magistr/ magіstr

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Gagarin Ave. 72, 49010

Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпро, пр. Гагаріна 72, 49010

Анотація. У статті наведено результати кінематичного аналізу маніпулятора методом Денавіта – Хартенберга. Структурна схема маніпулятора містить п'ять ланок поєднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу. Кінематичний аналіз та математичне моделювання рухів маніпулятора проведено з використанням програмного середовища MathCad. Впровадження результатів кінематичного аналізу дозволяє на етапі проектування мінімізувати кількість ступенів рухливостей для заданого технологічного процесу, обрати приводи та передаточні механізми, розробити ефективні алгоритми керування. Це дозволить знизити масу конструкції та споживану енергію, що обумовлює підвищення продуктивності під час експлуатації маніпулятора.

Ключові слова: маніпулятор, кінематика, матриця перетворень координат.

Вступ. При проектуванні нових маніпуляторів, впровадженні автоматизації виробництва та здійсненні наукових досліджень потрібно проводити кінематичний аналіз маніпулятора. Вибір параметрів конструкції (форма та геометричні розміри ланок, конструкція кінематичних пар, типи приводів та передавальних механізмів і т.п.) обумовлює синтез траєкторії при виконанні умов досяжності та орієнтації полюсу схвату маніпулятора у вузлових точках. Такий підхід може знизити вартість і забезпечити конфігурації, які можуть бути недосяжні універсальним маніпуляторам при діях в існуючому обмеженому середовищі. Для кінематичного аналізу маніпуляторів широко використовуються різноманітні аналітичні та чисельні методи. Студентський проект Glove передбачає створення пристрою керування (електронної рукавички) для забезпечення дистанційного керування маніпулятором. При роботі над проектом Glove виникла необхідність створити програмне забезпечення для здійснення кінематичного аналізу маніпулятора на етапах проектування, впровадження та експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При створенні нових конструкцій маніпуляторів застосовуються автоматизовані методи генерації кінематичної схеми. У статті [1] генерація кінематичної структури базується на масштабованих приводних модулях шарнірів і модулях несучих плечей з перевіркою допустимого крутного моменту приводу та згинального моменту несучого елемента. Для генерації варіацій кінематичних структур використовується алгоритм оптимізації, базова вимога функції придатності — це здатність проходити задану траєкторію з певною орієнтацією інструменту. Представлені результати досліджень дозволяють оптимізувати загальну вагу роботизованої руки з приводами в шарнірах та споживання електроенергії для



певного завдання керування.

У статті [2] представлено чотири різні алгоритми для генерації кінематичної схеми маніпулятора з використанням метода Денавіта-Хартенберга. Два алгоритми дозволяють оптимізувати кінематичну схему для зменшення похибки позиціонування схвату у заданій позиції. Для двох інших алгоритмів критерієм оптимізації кінематичної схеми є не лише похибка позиціонування а і орієнтація схвату. Запропоновані алгоритми оптимізації використовують сплайни Безьє, апроксимацію та векторну алгебру. Результати оцінюються шляхом вимірювання маніпулятивності та загальної довжини ланцюга кінематичних структур.

Для ефективного проектування надобмежених механізмів кінематичний опис маніпулятора здійснюється за методом Денавіта-Хартенберга, а кути Ейлера використовуються для формування геометричних обмежень синтезованих механізмів з надмірними обмеженнями. Шляхом регулювання довжин ланок, кутів закручування і кутів з'єднання генеруються різні схеми конструкції надобмежених механізмів. Новизна дослідження [3] полягає в модуляризації надобмеженого механізму на два рухомих послідовних маніпулятора, схвати яких мають ідентичну траєкторію та орієнтацію. Таким чином, визначення геометричних обмежень надобмеженого механізму може бути перетворено в знаходження кутових параметрів, що описують орієнтацію цих двох послідовних маніпуляторів. Кутові параметри послідовних маніпуляторів можуть бути легко визначені за допомогою кутів Ейлера. Представлений метод може бути поширений на кінематичний синтез та аналіз більш просторових механізмів замкнутого циклу.

Дослідження кінематики маніпулятора Comau NM45 у статті [4] містить розв'язання прямої та зворотної задач кінематики. Пряма задача кінематики вирішена методом Денавіта – Хартенберга. Для зворотної задачі кінематики маніпулятора використано підхід Піпера Використовуючи цей підхід, обернена кінематична задача розбивається на дві невеликі менш складні задачі. Це скорочує час кінематичного аналізу маніпулятора. Отримані аналітичні розв'язки було перевірено математичним моделюванням руху маніпулятора.

Пряма та зворотна задачі кінематики роботів Scara T6 та UR10 в статті [5] розв'язані в Matlab по алгоритму Денавіта-Хартенберга. Моделювання траєкторії виконано в Matlab. Запропоновано алгоритм синтезу траєкторій схвату маніпулятору з врахуванням координат початкової та кінцевої точки, максимальні швидкості і час руху.

Звичайні методи розв'язання задач кінематики маніпулятора не ефективні для конструкцій з ланками складної геометричної форми. У дослідженні [6] для вирішення прямої задачі кінематики маніпулятора застосовано матриці перетворень Денавіта-Хартенберга. Для знаходження рівнянь положення схвату використовується матриця трансформації. Алгоритми ALO, PSO, GWO та SCA використовуються для прогнозування орієнтації та позиціонування схвату маніпулятора в робочому просторі. Похибка позиціонування (різниця між реальним та цільовим розташуванням) оцінюється за допомогою фітнес-функції. Функція фітнесу використовувалася для знаходження обернених



кінематичних розв'язків шляхом зменшення похибки позиціонування положення полюсу схвата.

У статті [7] представлено набір алгоритмів синтезу кінематичних структур послідовних маніпуляторів з використанням множинних формулювань обмежень. Крім того, наведено порівняння продуктивності різних методів генерації кінематичної схеми: Денавіта-Хартенберга, добутку експоненціалів (гвинтів) та кутів Roll-Pitch-Yaw з параметрами трансляції. Наведені в [7] дані свідчать, що вибір методу проектування обмежень має значний вплив на успішність збіжності оптимізації. Вибір представлення має менший вплив на конвергенцію, але є відмінності в часі оптимізації та довжині спроектованих маніпуляторів. Крім того, найкращі результати досягаються при поєднанні декількох методологій.

Оскільки аналітичні моделі, отримані на основі геометричного методу, теорії гвинтів або чисельних методів, передбачають наближення і вимагають більшої обчислювальної потужності, вони не доцільні для управління маніпулятором в реальному часі. У статті [8] продемонстровано доцільність використання штучного інтелекту для розв'язання зворотної задачі кінематики маніпулятора, особливо для складних геометрій ланок. Результати, отримані за допомогою алгоритмів машинного навчання та підходу Денавіта-Хартенберга, порівнюються з експериментальними результатами для оцінки їх продуктивності. Кінематичну модель для запропонованого прикладу конструкції маніпулятора отримано з використанням модифікованого підходу, кінематичні розв'язки отримано за допомогою алгоритму Левенберга-Марквардта. Для передбачення наступної конфігурації маніпулятора застосовуються різні алгоритми прогнозування, такі як множинна лінійна регресія, багатовимірні поліноміальна регресія, опорний вектор, дерево рішень, випадкова лісова регресія та багатошарові мережі перцептрона. Набір даних, необхідний для навчання мережі, генерується експериментально з використанням концепції маркерів ArUco.

У статті [9] представлено результати проекту по створенню шарнірно-зчленованого робота-маніпулятора з трьома ступенями рухливостей. Для визначення положення схвату вирішено пряму задачу кінематики з використанням методу Денавіта-Хартенберга. Зворотна задача кінематики має алгебраїчний розв'язок геометричним методом, заснований на тригонометричних формулах. Моделювання рухів маніпулятора здійснено з використанням програмного середовища MATLAB. Крім того, розроблена електронна схема системи керування маніпулятора з використанням мікроконтролера Arduino.

Для забезпечення ефективного дистанційного керування маніпуляторами розробка алгоритмів, визначення номенклатури інформаційно-вимірювальних пристроїв та вибір каналів зв'язку здійснюється на основі результатів кінематичного та динамічного аналізу. У статті [10] представлені результати проектування регулятора точного положення для схвату маніпулятора. На першому етапі здійснено розв'язання прямої та зворотної задач кінематики маніпулятора методом Денавіта - Хартенберга. На другому етапі



проаналізовано динаміку маніпулятора за загальним рівнянням Ейлера-Лагранжа і формулою матриці Коріоліса. На третьому етапі запропоновано два закони управління положенням схвату маніпулятора з використанням PD - обчислювального контролеру крутного моменту (PD-СТС) і контролеру ковзного режиму (SMC). На четвертому етапі проведено чисельне моделювання рухів схвату маніпулятора під керуванням запропонованих контролерів. для робота-маніпулятора.

Зниження крутних моментів у кінематичних парах дозволяє знизити спожиту енергію, а також збільшити термін експлуатації маніпулятора. У статті [11] запропоновано використання алгоритмів еволюційних обчислень для оптимізації траєкторій руху маніпулятора з метою зниження крутних моментів з'єднання. Дослідження кінематичних властивостей маніпулятора проведено за методом Денавіта-Хартенберга, аналіз динаміки маніпулятора - методами Лагранжа-Ейлера та Ньютона-Ейлера. Застосовано алгоритми оптимізації на основі штучного інтелекту: генетичний алгоритм з використанням випадкової та середньої рекомбінації, імітаційний відпал з використанням лінійної та геометричної стратегії охолодження та диференціальної еволюції. Методи порівнюються, і результати показують, що генетичний алгоритм забезпечує найкращі результати щодо мінімізації крутного моменту.

Актуальність роботи обумовлена тим, що результати кінематичного аналізу є основою для створення, дослідження та вдосконалення маніпуляторів.

Мета дослідження – оптимізація конструкції маніпулятора методом кінематичного аналізу. Перелік якісних критеріїв для оптимізації кінематичної структури залежить від галузі застосування маніпулятора. Найбільш поширені параметри оцінювання при оптимізації кінематичної структури маніпулятора, це: 1) мінімізація ступенів рухливостей для заданого технологічного процесу, 2) робоча зона та межі досяжності полюса схвату, 3) перевірка на просторові зіткнення, 4) споживання енергії, 5) мінімізація маси.

Об'єкт дослідження. Студентський проект Glove передбачає створення пристрою керування (електронної рукавички) для забезпечення дистанційного керування маніпулятором. Об'єктом керування обрано п'ятиланковий маніпулятор з ротаційними кінематичними парами 5-го класу (рис.1).

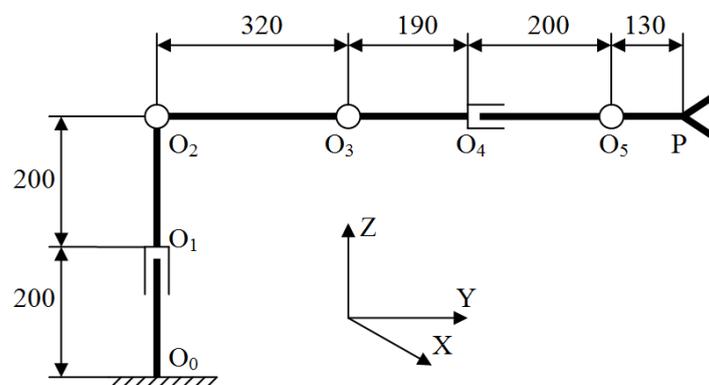


Рисунок 1 – Розрахункова схема маніпулятора

Авторська розробка



Матеріали та методи. Маніпулятор є відкритим кінематичним ланцюгом, жорсткі ланки якого з'єднані кінематичними парами п'ятого класу. Якщо кінематичний ланцюг не містить внутрішніх закритих контурів, то кількість кінематичних пар n визначає кількість ступенів рухливості маніпулятора. Положення кінематичного ланцюга маніпулятора визначається за допомогою узагальнених координат $q_i(t)$, ($i = 1, 2, \dots, n$), що характеризують відносні рухи в кінематичних парах. Кінематичний аналіз маніпулятора містить наступні завдання:

- перше завдання кінематики (пряма задача положення маніпулятора),
- друге завдання кінематики (зворотна задача положення маніпулятора).

Рішення зворотної задачі положення маніпулятора здійснюється як на стадії проектування, так і на стадії синтезу команд керування. Слід зазначити, що для маніпуляторів з великою кількістю ступенів рухливості задану позицію спеціальної точки Р (полюсу схвата) можна забезпечити декількома наборами узагальнених координат. Вибір оптимального рішення засновано на додаткових обмеженнях або критеріях якості. Кінематичний аналіз маніпулятора проводимо за методом Денавіта -Хартенберга.

Маніпулятор переміщує схват з навантаженням (заготівка, інструмент, контрольні та вимірювальні пристрої) згідно з даним законом руху. Залежно від мети маніпулятора на різних ділянках траєкторії параметри навантаження можуть змінюватися: геометричні розміри, форма, розподіл маси. Ці особливості враховано на етапі складання математичної моделі, оскільки коефіцієнти диференціальних рівнянь є функціями узагальнених координат маніпулятора та залежать від закону руху та параметрів навантаження.

Для кінематичний аналізу маніпулятора застосовано пакет прикладних програм Mathcad.

Початкові умови. Кінематичний аналіз виконано за розрахунковою кінематичною схемою маніпулятора (рис. 1). Довжина кожної ланки у мм наведена на розрахунковій схемі (рис.1), щільність ланок маніпулятора $\rho = 1,5$ г/см³. Початкові положення ланок $q_{10} = 0,25\pi$ рад, $q_{20} = 0,25\pi$ рад, $q_{30} = 0$ рад, $q_{40} = 0$ рад, $q_{50} = 0,25\pi$ рад.

З кожною ланкою маніпулятора зв'язана права система декартових координат $Ox_i y_i z_i$. Початок координат O_i розташовано в центрі шарніра. Одна з вісей координат спрямована з віссю шарніра, друга вісь координат направлена вздовж вісі симетрії ланки, третя вісь - доповнює праву систему [12]. Базова система координат пов'язана з нерухливою основою маніпулятора. Рух полюса схвата маніпулятора визначається зміною у часі узагальнених координат $q_i(t)$, які є кутами обертання у кінематичних парах. Закон зміни узагальнених координат визначається параметрами виконавчих приводів. Припустимо, що реалізуються наступні закони зміни узагальнених координат:

$$\begin{aligned} q_1(t) &= 0.025t^2 + 0.01t + q_{10}, & q_2(t) &= -0.03t^2 - 0.01t + q_{20}, \\ q_3(t) &= -0.03t^2 - 0.01t + q_{30}, & q_4(t) &= 0.1t^2 + 0.01t + q_{40}, \\ q_5(t) &= 0.1t^2 + 0.01t + q_{50}. \end{aligned}$$



Результати досліджень та обговорення

Перше завдання кінематики. За заданою кінематичною схемою маніпулятора та законами руху (законами змін узагальнених координатах $q_i(t), i = 1, \dots, 5$) визначено положення особливої точки Р (полюсу схвата) у базовій системі координат. Складено матриці перетворення координат:

$$A_4^5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}q_5 & -\text{Sin}q_5 & 200 \\ 0 & \text{Sin}q_5 & \text{Cos}q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_3^4 = \begin{bmatrix} \text{Cos}q_4 & 0 & -\text{Sin}q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 190 \\ \text{Sin}q_4 & 0 & \text{Cos}q_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}q_3 & -\text{Sin}q_3 & 320 \\ 0 & \text{Sin}q_3 & \text{Cos}q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_1^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}q_2 & -\text{Sin}q_2 & 0 \\ 0 & \text{Sin}q_2 & \text{Cos}q_2 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \text{Cos}q_1 & -\text{Sin}q_1 & 0 & 0 \\ \text{Sin}q_1 & \text{Cos}q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Координати полюсу схвату в системі координат зв'язаній з п'ятою ланкою $\vec{r}_P^5 = (0 \ 130 \ 0 \ 1)^T$, а в базовій системі координат

$$\vec{r}_P^0 = f(q_1(t), q_2(t), \dots, q_k(t)) = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5 \cdot \vec{r}_P^5 = T_5 \cdot \vec{r}_P^5,$$

де \vec{r}_P^0 - вектор координат полюсу схвату в базовій системі координат, \vec{r}_P^5 - вектор координат полюсу схвату в системі координат зв'язаній з п'ятою ланкою, $T_5 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5$ - загальна матриця перетворення координат від 5-ої ланки до 0-го ланки (основи маніпулятора).

Для обчислення швидкостей та прискорень полюсу схвату відносно базової системи координат скористаємося формулами:

$$\vec{v}_P^0 = \vec{r}_P^{0'} = \frac{d}{dt}(T_5 \cdot \vec{r}_P^5) = \frac{d}{dt}T_5 \cdot \vec{r}_P^5,$$

$$\vec{a}_P^0 = \vec{r}_P^{0''} = \frac{d^2}{dt^2}(T_5 \cdot \vec{r}_P^5) = \frac{d^2}{dt^2}T_5 \cdot \vec{r}_P^5.$$

Результати розв'язання прямої задачі кінематики з використанням пакету прикладних програм Mathcad наведено на рис.2.

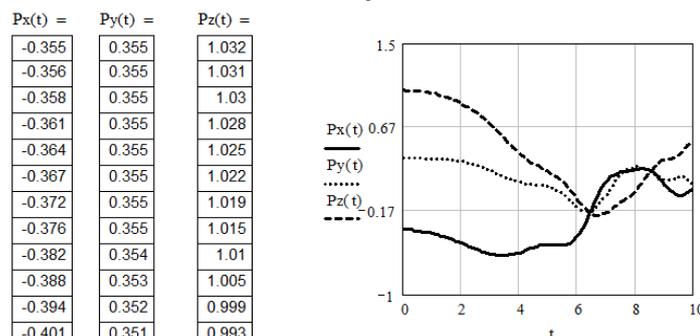


Рисунок 2 – Результати розв'язання прямої задачі кінематики

Авторська розробка



Результати математичного моделювання швидкості та прискорення полюсу схвату відносно базової системи координат наведено на рис. 3.

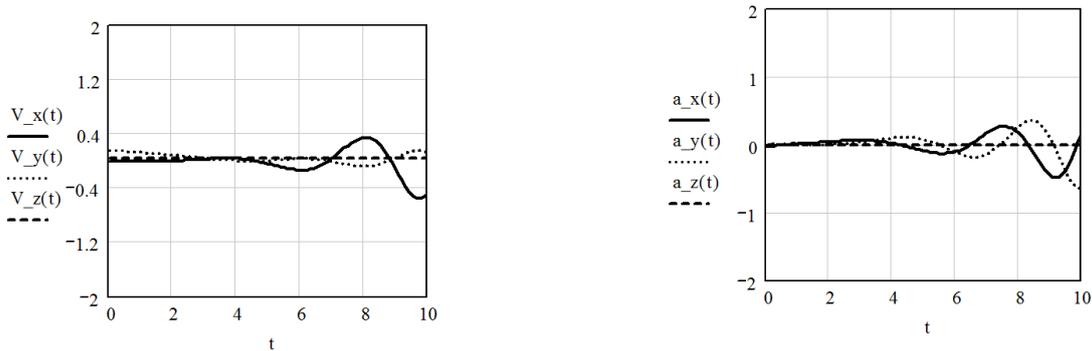


Рисунок 3 – Моделювання швидкості та прискорення полюсу схвату відносно базової системи координат

Авторська розробка

За результатами математичного моделювання швидкостей та прискорень полюсу схвату можна обрано виконавчі приводи у кінематичних парах та передаточні механізми маніпулятора за умови забезпечення заданої траєкторії полюса схвату та зменшення споживаної енергії.

Друге завдання кінематики. За відомою кінематичною схемою маніпулятора встановити набори значень узагальнених координат для забезпечення заданого положення та орієнтації полюсу схвату в базовій системі координат.

Положення та орієнтацію полюсу схвату визначимо за допомогою трьох лінійних $x(t), y(t), z(t)$ та трьох кутових координат $\alpha(t), \beta(t), \gamma(t)$. Для обчислення $q_i(t_m), i = 1..5$ скористаємось формулою

$$\vec{r}_P^5 = (T_n)^{-1} \cdot \vec{r}_P^0,$$

де \vec{r}_P^0 - вектор координат полюсу схвату в базовій системі координат, \vec{r}_P^5 - вектор координат полюсу схвату в системі координат зв'язаній з п'ятою ланкою, $T_5 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 \cdot A_4^5$ - загальна матриця перетворення координат від 5 -ої ланки до 0 - го ланки (основи маніпулятора). Якщо врахувати, що для моменту часу t_m координати полюсу схвату дорівнюють

$$\vec{r}_P^n = f(t_m, x(t_m), y(t_m), z(t_m), \alpha(t_m), \beta(t_m), \gamma(t_m)),$$

можна записати

$$\begin{aligned} x(t_m) &= F_1(t_m, q_1(t_m), q_2(t_m), \dots, q_i(t_m), \dots, q_n(t_m)), \\ y(t_m) &= F_2(t_m, q_1(t_m), q_2(t_m), \dots, q_i(t_m), \dots, q_n(t_m)), \\ z(t_m) &= F_3(t_m, q_1(t_m), q_2(t_m), \dots, q_i(t_m), \dots, q_n(t_m)), \\ \alpha(t_m) &= F_4(t_m, q_1(t_m), q_2(t_m), \dots, q_i(t_m), \dots, q_n(t_m)), \\ \beta(t_m) &= F_5(t_m, q_1(t_m), q_2(t_m), \dots, q_i(t_m), \dots, q_n(t_m)), \\ \gamma(t_m) &= F_6(t_m, q_1(t_m), q_2(t_m), \dots, q_i(t_m), \dots, q_n(t_m)). \end{aligned} \tag{1}$$

Таким чином, для вирішення другого завдання кінематики у загальному випадку потрібно для моменту часу t_m розв'язати систему нелінійних рівнянь виду (1).



Метод рішення системи рівнянь (1) залежить від кількості узагальнених координат в кінематичній схемі маніпулятора. Для розглянутої конструкції $n = 5$. Якщо $n < 6$, то рішення системи рівнянь (1) існує для обмеженого набору положень схвата. В цьому випадку робоча зона маніпулятора має обмеження. Система рівнянь (1) доповнена обмеженнями, ефективно вирішуються в середовищі Mathcad.

Результати розв'язання зворотної задачі кінематики з використанням пакету прикладних програм Mathcad наведено на рис.4.

.Zvorotna_zadacha_kinematiki

$$q1k := 0 \quad q2k := 0 \quad q3k := 0 \quad q4k := 0 \quad q5k := 0$$

$$Xp := -0.3 \quad Yp := 0.433 \quad Zp := -0.017$$

Given

$$Xp = \sin(q1k) \cdot (0.8 + 0.7 \cdot \cos(q2k)) + 0.6 \cdot \cos(q2k + q3k) + 0.3 \cdot \cos(q2k + q3k + q4k) - 0.05 \cdot \sin(q2k + q3k + q4k) \cdot \sin(q5k)$$

$$Yp = \cos(q1k) \cdot (0.8 + 0.7 \cdot \cos(q2k)) + 0.6 \cdot \cos(q2k + q3k) + 0.3 \cdot \cos(q2k + q3k + q4k) - 0.05 \cdot \sin(q2k + q3k + q4k) \cdot \sin(q5k)$$

$$Zp = -0.05 \cdot \cos(q2k + q3k + q4k) \cdot \sin(q5k) - .3 \cdot \sin(q2k + q3k + q4k) + .5 - .6 \cdot \sin(q2k + q3k) - .7 \cdot \sin(q2k)$$

$$\text{Find}(q1k, q2k, q3k, q4k, q5k) \rightarrow \begin{pmatrix} 2.5356878027030048394 & 2.5356878027030048394 & -60590485088678839908 & -60590 & \\ 2.8161645253338211005 & 2.2303957487587411127 & 1.4488657403016409034 & .56541 & \\ .32542812825597213796 & .91119690483105212578 & 1.6927269132881523351 & 2.5761 & \\ -1.3574737674987986556 & .12084873441177439190 & 2.5072147520089949754 & -.49293 & \\ 0 & 0 & 0 & & \end{pmatrix}$$

Рисунок 4 – Результати розв'язання зворотної задачі кінематики

Авторська розробка

За результатами кінематичного аналізу виконано оптимізацію конструкції маніпулятора (рис.4).

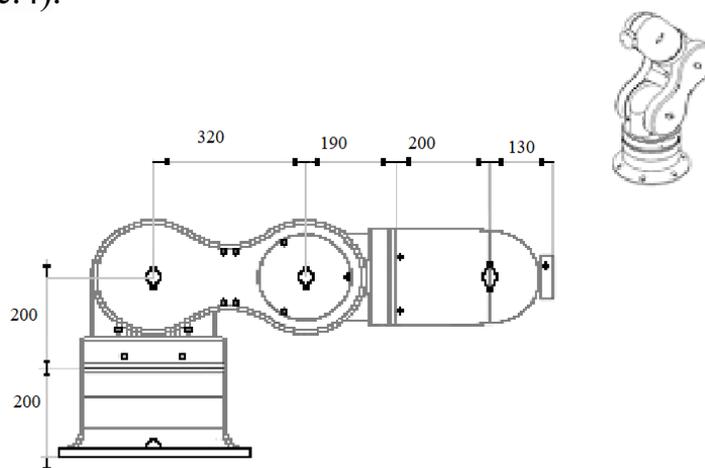


Рисунок 4 – Схема конструкції маніпулятора

Авторська розробка

При опрацюванні конструкції маніпулятора визначено геометричну форму та розміри ланок маніпулятора з метою мінімізації маси. На основі аналізу швидкостей та прискорень обрано виконавчі приводи та передаточні механізми маніпулятора за умови зменшення споживаної енергії. Моделювання рухів маніпулятора дозволило визначити межі досяжності полюса схвата



Висновки. Проведення кінематичного аналізу маніпулятора виконано методом перетворення координат Денавіта - Хартенберга. Застосування пакету прикладних програм Mathcad дозволяє формалізувати процес розрахунку, знизити витрати часу та зменшити кількість помилок. Використання результатів кінематичного аналізу дозволило оптимізувати геометричні розміри ланок, обрати тип виконавчих приводів та передаточних механізмів. Це дозволить знизити масу конструкції та споживану енергію, що обумовлює підвищення продуктивності під час експлуатації маніпулятора. Створене програмне забезпечення буде у подальшому застосовано при розробці алгоритмів дистанційного керування маніпулятором.

Література

1. Mostýn V., Huczala D., Moczulski W. A. Dimensional optimization of the robotic arm to reduce energy consumption. *MM Science Journal*. 2020. No. 1. P. 3745–3753. DOI: [10.17973/MMSJ.2020_03_2020001](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_03_2020001).
2. Huczala D., Pfuner M., Mostýn V. Initial estimation of kinematic structure of a robotic manipulator as an input for Its synthesis. *Applied Sciences*. 2021. No. 11(8). DOI: [10.3390/app11083548](https://doi.org/10.3390/app11083548).
3. Lee F.-H., Hsu K.-L. A synthesis method of spatial over-constrained mechanisms based on kinematics of serial manipulators. *Robotica*. 2022. No. 40(12). P. 1-25. DOI: [10.1017/S0263574722000868](https://doi.org/10.1017/S0263574722000868)
4. Asif S., Webb P. Kinematics Analysis of 6-DoF Articulated Robot with Spherical Wrist. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. No. 4. DOI: [10.1155/2021/6647035](https://doi.org/10.1155/2021/6647035)
5. Diaz C. P., Palomares R. J., Alva J. and Cornejo J. Mechatronics design and robotic simulation of serial manipulators to perform automation tasks in the avocado Industry. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023. No. 14(8). DOI: [10.14569/IJACSA.2023.0140856](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140856)
6. Jangid M. K., Kumar S., Singh J. Inverse kinematics solutions of a newly designed three-link robotic manipulator for the casting process using the ant lion optimizer. *The International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2023. No. 9. P. 1704–1717. DOI: [10.19101/IJATEE.2021.876125](https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.876125)
7. Huczala D., Kot T., Pfuner M. and Bobovsky Z. Multirepresentations and Multiconstraints approach to the numerical synthesis of serial kinematic structures of manipulators. *IEEE Access*. 2022. No. 10. P. 68937-68951. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3186098](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186098).
8. Thomas M.J., Sanjeev M.M., Joy M.L. Comparative study of various machine learning algorithms and Denavit–Hartenberg approach for the inverse kinematic solutions in a 3- PP SS parallel manipulator. *Industrial Robot the international journal of robotics research and application*. 2020. DOI: [10.1108/IR-11-2019-0233](https://doi.org/10.1108/IR-11-2019-0233)
9. Dawood H., Hamzah M., Bakhy S. H. Kinematics analysis and implementation of three degrees of freedom robotic arm by using MATLAB. *The Iraqi Journal for Mechanical and Materials Engineering*. 2021. No. 21(2). P. 118-129. DOI: [10.32852/ijqfmme.v21i2.547](https://doi.org/10.32852/ijqfmme.v21i2.547)
10. Nguyen Q.T., Phan T.V., Vo D.-T. and other. Kinematics, dynamics and



control design for a 4-DOF robotic manipulator. *Conference: 2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*.. Ho Chi Minh City, Vietnam, August 2021, P. 138-144. DOI: [10.1109/ICSSE52999.2021.9538418](https://doi.org/10.1109/ICSSE52999.2021.9538418).

11. Šegota S. B., Lorencin I., Car Z. and other. Path planning optimization of six-degree-of-freedom robotic manipulators using evolutionary algorithms. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020. No. 17(2). P. 1-16. DOI: [10.1177/1729881420908076](https://doi.org/10.1177/1729881420908076).

12. Ащепкова Н. С. Метод кинематического и динамического анализа манипулятора с использованием Mathcad. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 5/7(77). С. 54–63. DOI: [10.15587/1729-4061.2015.51105](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51105).

References

1. Mostýn V., Huczala D., Moczulski W. A. Dimensional optimization of the robotic arm to reduce energy consumption. *MM Science Journal*. 2020. No. 1. P. 3745–3753. DOI: [10.17973/MMSJ.2020_03_2020001](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_03_2020001).

2. Huczala D., Pfüner M., Mostýn V. Initial estimation of kinematic structure of a robotic manipulator as an input for Its synthesis. *Applied Sciences*. 2021. No. 11(8). DOI: [10.3390/app11083548](https://doi.org/10.3390/app11083548).

3. Lee F.-H., Hsu K.-L. A synthesis method of spatial over-constrained mechanisms based on kinematics of serial manipulators. *Robotica*. 2022. No. 40(12). P. 1-25. DOI: [10.1017/S0263574722000868](https://doi.org/10.1017/S0263574722000868)

4. Asif S., Webb P. Kinematics Analysis of 6-DoF Articulated Robot with Spherical Wrist. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. No. 4. DOI: [10.1155/2021/6647035](https://doi.org/10.1155/2021/6647035)

5. Diaz C. P., Palomares R. J., Alva J. and Cornejo J. Mechatronics design and robotic simulation of serial manipulators to perform automation tasks in the avocado Industry. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2023. No. 14(8). DOI: [10.14569/IJACSA.2023.0140856](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140856)

6. Jangid M. K., Kumar S., Singh J. Inverse kinematics solutions of a newly designed three-link robotic manipulator for the casting process using the ant lion optimizer. *The International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2023. No. 9. P. 1704–1717. DOI: [10.19101/IJATEE.2021.876125](https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.876125)

7. Huczala D., Kot T., Pfüner M. and Bobovský Z. Multirepresentations and Multiconstraints approach to the numerical synthesis of serial kinematic structures of manipulators. *IEEE Access*. 2022. No. 10. P. 68937-68951. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3186098](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186098).

8. Thomas M.J., Sanjeev M.M., Joy M.L. Comparative study of various machine learning algorithms and Denavit–Hartenberg approach for the inverse kinematic solutions in a 3- PP SS parallel manipulator. *Industrial Robot the international journal of robotics research and application*. 2020. DOI: [10.1108/IR-11-2019-0233](https://doi.org/10.1108/IR-11-2019-0233)

9. Dawood H., Hamzah M., Bakhy S. H. Kinematics analysis and implementation of three degrees of freedom robotic arm by using MATLAB. *The Iraqi Journal for Mechanical and Materials Engineering*. 2021. No. 21(2). P. 118-129. DOI: [10.32852/ijqfmme.v21i2.547](https://doi.org/10.32852/ijqfmme.v21i2.547)

10. Nguyen Q.T., Phan T.V., Vo D.-T. and other. Kinematics, dynamics and control design for a 4-DOF robotic manipulator. *Conference: 2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*.. Ho Chi Minh City, Vietnam, August 2021, P. 138-144. DOI: [10.1109/ICSSE52999.2021.9538418](https://doi.org/10.1109/ICSSE52999.2021.9538418).

11. Šegota S. B., Lorencin I., Car Z. and other. Path planning optimization of six-degree-of-freedom robotic manipulators using evolutionary algorithms. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020. No. 17(2). P. 1-16. DOI: [10.1177/1729881420908076](https://doi.org/10.1177/1729881420908076)

12. Ashhepkova N.S. Mathcad in the kinematic and dynamic analysis of the manipulator.



Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 5/7(77). С. 54–63.
DOI: [10.15587/1729-4061.2015.51105](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51105).

Abstract. *The article presents the results of the kinematic analysis of the manipulator using the Denavit-Hartenberg method. The structural diagram of the manipulator contains five links connected by rotary kinematic pairs of the fifth class. Kinematic analysis and mathematical modeling of the movements of the manipulator were carried out using the MathCad programming environment. Implementation of the results of kinematic analysis allows at the design stage to minimize the number of degrees of mobility for a given technological process, to choose drives and transmission mechanisms, to develop effective control algorithms. This will allow to reduce the weight of the structure and the energy consumed, which leads to an increase in productivity during the operation of the manipulator.*

Keywords: *manipulator, kinematics, coordinate transformation matrix.*

*Стаття підготовлена в рамках роботи за д/б темою
№ 0122 U 001326 «Науково- методичне забезпечення прикладних
досліджень в механіці механотронних систем», 2022-2024 р.р.
Дослідження проведено в Noosphere Engineering School при фінансовій
підтримці ГО «Асоціація Ноосфера».*

Статья отправлена: 17.12.2023 г.
© Ащепкова Н.С., Опшитош Н.С.

*The article was prepared as part of the work on the d/b topic
No. 0122 U 001326 "Scientific and methodical support of applied research
in the mechanics of mechanotronic systems", 2022-2024.
The research was carried out at the Noosphere Engineering School
with the financial support of the GO "Noosphere Association".*

Article sent: 17.12.2023 г.
© Ashchepkova N.S., Opshitosh N.O.



УДК 621.39

ANALYSIS OF PHOTO DETECTORS USED IN SENSOR NETWORKS АНАЛІЗ ФОТОДЕТЕКТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Irkha V.I. / Ірха В.І.

s.ph-m.s., as.prof. / к.ф.-м.н., доц.

Markolenko P.Yu. / Марколенко П.Ю.

s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0001-5636-5111

*State University of Intellectual Technology and Communication, Odessa, Kuznechna 1, 65029
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, вул. Кузнєчна 1, 65029*

Анотація. В роботі розглядаються основні проблеми побудови сенсорних мереж, що стосуються споживання енергії мережі та залежності її роботи від пропускної здатності базових станцій. Одними з найважливіших елементів мережі є фотоприймачі, робота яких впливає на швидкість та і цілність передачі інформації. Саме тому в роботі розглянуті сучасні конструкції світлових фотодетекторів, їх основні характеристики та недоліки. Запропоновані фотоприймачі можуть покращити швидкість передачі даних в сучасних сенсорних мережах.

Ключові слова: сенсорні мережі, базові станції, пропускна здатність, фотоприймачі, швидкість, цілність, передача інформації.

Вступ.

Існують дві основні проблеми побудови сенсорних мереж: по-перше, сенсорні мережі споживають основну частину енергії мережі, а по-друге, час роботи всієї мережі залежить від пропускної станції базових станцій, оскільки обробка даних, отриманих від датчиків, підтримується на технологіях роботи окремих датчиків. Для вирішення другої проблеми швидкості та ефективності сенсорних мереж на разі впроваджується апаратно програмні рішення для оптимізації трафіку з використанням пакету нових технологій MEC (Multi-Access Edge Computing) або ECMA (Edge Computing with Multiple Access). Справа в тому, що більшість програм надають свої онлайн-обчислення (обробка даних) і зберігання контенту на віддалених серверах (хмарні обчислення), які зазвичай розташовані далеко від кінцевого користувача. При використанні технологічного пакету MEC частина функцій обробки та зберігання даних виконується на межі бездротової сенсорної мережі за допомогою спеціального MEC Server, інтегрованого в базові станції.

Архітектура MEC включає в себе набір ключових технологій для інтеграції IoT у бездротові системи. Важливішими з яких є:

- віртуалізація мережевих функцій (NFV);
- програмно визначена мережа (SDN);
- інформаційно-визначена мережа (ICN);
- розрізання мережі (NS).

Це дає можливість проводити фільтрацію трафіку, полегшує можливість прийняття рішень на основі локально оброблених даних на межі мережі, що зменшує наскрізну затримку (E2E), підвищує масштабованість і термін служби пристроїв IoT.



Але застосування будь-яких технологій може бути обмеженим властивостями елементів системи мережі. Одним із таких елементів є фотоприймач, швидкість дії якого може істотно впливати на швидкість та щільність передачі даних в мережі. Тому в роботі розглянуті основні типи та конструкції фотоприймачів, що можуть використовуватись в таких мережах.

1. Сучасний стан сенсорних мереж.

Напівпровідникові фотоприймачі використовуються в якості чутливих елементів в усіх відеокамерах, датчиках руху, детекторах полум'я, пірометрах, світлових індикаторах, у фотореле у системах вуличного освітлення, тепловізорах, люксометрах, приладах нічного бачення, як джерело напруги в сонячних батареях. Однак, основна частина фотодетекторів – це невід'ємна частина всієї системи оптичного зв'язку, яка приймає корисний оптичний сигнал та перетворює його в електричний.

За прогнозами Cisco, у 2024 році кількість об'єктів Інтернету речей (IoT) зросте більш ніж до 50 мільярдів підключених пристроїв. Необхідно забезпечити високошвидкісний зв'язок для великої кількості користувачів одночасно.

Швидкість і щільність передачі інформації по оптичних каналах зв'язку в сотні разів вище, ніж по радіоканалах. У зв'язку з цим протягом десятиліть ведуться дослідження щодо розробки технології побудови оптичної бездротової локальної мережі Li-Fi, яка б стала альтернативою використанню поширеного радіоканалу бездротової локальної мережі Wi-Fi, мережі. Такі фірми, як General Electric (США), Koninklijke Philips NV (Нідерланди), Oledcomm (Франція), pureLiFi Limited (Велика Британія), Panasonic Corporation (Японія), Acuity Brands, Inc. (США), LightPointe Communications Inc. (США), LightBee Corporation (США), FSONA Networks (Великобританія) вже виробляють обладнання для побудови оптичних бездротових локальних мереж.

Li-Fi (Light Fidelity) – технологія побудови бездротової оптичної локальної мережі, яка реалізована як конкурент радіоканалу локальної мережі Wi-Fi (Wireless Fidelity) [1], що використовує соціальне освітлення як канал для передачі даних.

Зовнішні електронні USB-ключі для використання технології Li-Fi вже давно виробляються масово, а з 2020 року компанія Getak Technorlogy Corp випускає планшети з вбудованою функцією Li-Fi. Завдяки цим великим гравцям ринок Li-Fi став надзвичайно конкурентним [2].

Провідні українські дистриб'ютори обладнання для систем освітлення вже представляють готову продукцію для організації локальних Li-Fi мереж. Інтегрований світлодіодний світильник PureLiFi служить точкою доступу Li-Fi і оснащений маршрутизатором і драйвером лампи. Він сумісний зі світлодіодами кількох різних виробників. Наразі гаджети повинні використовувати зовнішній ключ із виходом USB для отримання та декодування даних низхідної лінії зв'язку та модуляції сигналу завантаження для передачі інформації висхідної лінії зв'язку через канал Li-Fi.

2. Сучасні конструкції фото детекторів.

В даний час в техніці використовуються тільки напівпровідникові



фотоприймачі, які відрізняються принципом перетворення світлової енергії в електричний сигнал. Серед них фоторезистор – це в найпростішому випадку напівпровідникова пластина з двома омичними контактами. Фоторезистор використовує ефект фотопровідності - підвищення провідності зразка напівпровідника в результаті генерації електронно-діркових пар фотонами. Струм в основному формується основними носіями Δp , оскільки вони вільно проходять через омичні контакти. Неосновні носії Δn зберігаються на одному з контактів, де вони викликають додаткову ін'єкцію основних носіїв, доки вони не об'єднуються. Завдяки такій властивості неосновних носіїв заряду, які накопичуватися біля одного з омичних контактів фоторезистор має внутрішнє посилення фотоструму. Основною перевагою фоторезисторів є велике внутрішнє посилення фотопровідності $G_{pc} \sim 20 \div 100$. яке можна отримати, якщо пристрої виготовлені з матеріалів з великим часом життя неосновних носіїв τ_n . Але при цьому зменшується частота роботи фотоприймача f_{max} . Тому внутрішнє посилення фоторезистора найчастіше збільшується шляхом зменшення часу проходження бази резистора основними носіями заряду

$$t_p^{TRANS} = \frac{d^2}{\mu_p \cdot U},$$

а це вимагає високої рухливості μ_p і короткої відстані d між

електродами. Недоліками фоторезисторів є великий темповий струм I_{DARK} , низька робоча частота f_{max} і сильна залежність вихідного струму від зовнішньої температури. Крім того, фоторезистор споживає велику кількість енергії через великий темновий струм. Залежність струму через фоторезистор від освітленості (вихідна характеристика фотодетектора) нелінійна.

Так, у роботі [4] представлено сучасну комплексну конструкцію фотоприймача GaAs на основі структури метал-напівпровідник-метал, в якій напівпровідниковий шар епітаксіально вирощено на підкладці Si. Вирощування GaAs здійснюється за допомогою ультратонких низькотемпературних прошарок Ge. Результат показують чудову світлочутливість $(0,54 \pm 0,15)$ А/Вт.

Фотодіод – *p-n*-перехід із прозорим вікном у корпусі приладу для надходження світла на базу приладу. У фотодіоді використовується фотогальванічний ефект – електронно-діркові пари, створені фотонами, розділяються вбудованою різницею потенціалів *p-n*-переходу, що значно збільшує дрейфовий струм через перехід при освітленні.

Завдяки фотоелектричному ефекту внутрішнього розділення фотоносіїв заряду, будь-який фотодіод може бути використаний як джерело напруги – сонячна батарея, яка перетворює світлову енергію в електричну. Носії заряду, створені світлом, будуть розділятися, доки напруга, створювана світлом, не компенсує вбудовану різницю потенціалів. Для збільшення струму, який створює сонячна батарея, площа робочої основи переходу робиться великою. Коли фотодіод використовується як фотодетектор, зворотна зовнішня напруга прикладається до *p-n*-переходу для отримання мінімального темного струму I_{DARK} . Основною перевагою фотодіода є малий темповий струм I_{DARK} . Фотодіод потребує стабільної зовнішньої напруги живлення для суворого фіксування робочої точки для отримання лінійної вихідної характеристики. Недоліками



фотодіода є повна відсутність внутрішнього підсилення $G_{PH} = 1$, недостатня робоча частота f_{max} залежність вихідного струму від зовнішньої температури.

Було запропоновано нову архітектуру фотодіодного детектора з резонансними осередками, в якій дзеркала замінені на ґратчасті метаповерхні. Показано, що структуровані фотодетектори середнього ІЧ-діапазону товщиною менше 10 мкм з поглиначем світла HgCdTe товщиною 75 нм можуть забезпечити неперевершену максимальну ефективність [5].

Фотодіоди на основі змішаних одновимірних (1D) і тривимірних (3D) $p-n$ -гетероструктур із синергічними властивостями різних розмірів показали унікальні оптичні властивості завдяки великим перехідним площам і високому поперечному перетину поглинання, що забезпечує відмінну оптико-електронні характеристики. Однак через складність проектування та створення належного 1D-3D $p-n-j$ -переходу їхні електронні властивості все ще неясні. У [6] структуру 1D-3D ZnO / CsPbBr₃ $p-n$ -переходу створено шляхом вирощування кристалічних мікропластин CsPbBr₃ на нанодротах ZnO в рідкій фазі, які виявляють чудові фотодетекторні властивості. Як фотодетектор він охоплює світло від ультрафіолетового до видимого світла.

$P-i-n$ -фотодіод – це фотодіод, в якому p - та n -області переходу розділені шаром ізолятора для зниження бар'єрної ємності $p-n$ -переходу, за рахунок чого збільшується робоча частота фотоприймача f_{max} . $P-i-n$ -фотодіод також використовує фотогальванічний ефект. Основними перевагами $p-i-n$ -фотодіода є малий темповий струм I_{DARK} і велика робоча частота фотоприймача f_{max} . $P-i-n$ -фотодіод потребує стабільної зовнішньої напруги живлення для точного фіксування робочої точки для отримання лінійної вихідної характеристики. Недоліком $p-i-n$ -фотодіода є повна відсутність внутрішнього посилення $G_{PH} = 1$.

Розглядаються сучасні конструкції германієвого $p-i-n$ -фотодетектора з резонансною метаповерхнею нормального падіння для вирішення проблеми компромісу між квантовою ефективністю детектора, його робочою частотою та довжиною хвилі випромінювання, яке поглинається в базі діоду. Завдяки надтонкому внутрішньому шару ізолятора товщиною 350 нм, досягається висока зовнішня квантова ефективність понад 60% і чітке розпізнавання імпульсів світлового сигналу на швидкості передачі інформації 20 Гб/с.

Нова сучасна конструкція високошвидкісного $p-i-n$ -фотодетектора нормального падіння на основі GeSn представлена в [7]. Щоб реалізувати високошвидкісне виявлення в усіх діапазонах зв'язку, було оптимізовано концентрацію домішки Sn в поглинаючому шарі, товщину поглинаючого шару та розмір пристрою. Чутливість пристрою зі стороною вікна 18 мкм при товщині 1550 нм досягає 0,32 А/Вт з розширеною довжиною хвилі відсічення 1700 нм (інфрачервоний діапазон світла) і смугою пропускання 3 дБ до 28 ГГц при зміщенні 3 В.

Ведеться розробка германієвих вертикальних $p-i-n$ -фотодіодів з масивом заглиблень у формі гарбуза на поверхні бази. Фотодіоди виготовлені на германієвій підкладці з чудовою чутливістю 0,74 А/Вт. За допомогою моделювання підраховано, що конструкція заглиблень у формі гарбуза забезпечує більш високе оптичне поглинання порівняно з отвором у формі



циліндра.

Також у *p-i-n*-фотодіоді для захоплення фотонів вперше були введені мікроструктури в базу фотодетектора на основі Ge-Sn за рахунок чого було досягнуто високоефективне детектування випромінювання на довжині хвилі 2 нм з чутливістю 0,11 А/Вт. Демонстраційний зразок був реалізований за допомогою Ge-Sn/Ge множинної квантової ями (MQW).

Лавинний фотодіод (APD) – це *p-i-n*-фотодіод, який працює при високих зворотних напругах, достатніх для ударної іонізації атомів швидкими носіями заряду. На відміну від звичайного *p-i-n*-фотодіоду це пристрій із внутрішнім посиленням. Він використовує фотогальванічний ефект разом з лавинним помноженням фотоносіїв – це збільшення числа носіїв заряду при зіткненнях високошвидкісних носіїв заряду з атомами. При збільшенні зворотної напруги на *p-n*-переході до деякого порогового значення носії заряду в сильному електричному полі *p-n*-переходу починають набирати швидкість, достатню для іонізації ними атомів з утворенням електрон-дірочних пар – нових носіїв заряду. Самі нові утворені носії заряду беруть участь у подальшій іонізації. Процес збільшення концентрації носіїв, а отже, і струму, має лавиноподібний характер. Основними перевагами лавинного фотодіода є великий коефіцієнт посилення фотоструму $G_{AV} \sim 100$ і велика робоча частота f_{max} . Лавинний фотодіод має велику чутливість: він може виявляти більш слабкі оптичні сигнали. Недоліками лавинного фотодіода є високий рівень сторонніх шумів у вихідному сигналі і сильна залежність вихідного струму від зовнішньої напруги і температури. Вихідна характеристика лавинного фотодіода нелінійна. Крім того, лавинний фотодіод вимагає більшої напруги зміщення, тому він споживає багато енергії. Лавинний фотодіод є кращим фотодетектором для аерофотозйомки та для високошвидкісного оптоволоконного зв'язку на великі відстані завдяки його внутрішньому посиленню, яке забезпечує запас чутливості порівняно зі звичайними *p-i-n*-фотодіодами. Чутливість лавинного фотодіода на 5-10 дБ вища, ніж звичайного *p-i-n*-фотодіода, за умови, що шум множення низький, а добуток посилення на смугу пропускання достатньо великий. Для високошвидкісного оптичного зв'язку запропоновано новий мал шумний лавинний фотодіод на основі традиційного матеріалу InP з нанорозмірними квантовими ямами в базі діода.

Великий інтерес представляє розробка мал шумливих лавинних фотодіодів в короткохвильовій інфрачервоній області (1,5-3 нм) і в середньохвильовій інфрачервоній області (3-5 нм). Сучасні лавинні фотодіоди засновані на міжзонних переходах у телурид ртуті-кадмію (HgCdTe) з високим підсиленням і низьким коефіцієнтом надлишкового шуму завдяки сприятливій зонній структурі, яка сприяє ударній іонізації одного носія. Однак, при кімнатній температурі для коефіцієнта множення лавини 10 темновий струм такого лавинного фотодіода є високим, що вимагає криогенного охолодження. А це потребує додаткових витрат ресурсів.

Фототранзистор – це транзистор із відкритим вікном в корпусі пристрою для влучення падаючого світла на базу транзистора. Фототранзистор використовує фотогальванічний ефект з додатковою інжекцією носіїв заряду. При цьому



генеровані світлом неосновні носії, як у фоторезисторі, накопичуються в базі транзистора і знижують потенційний бар'єр емітерного переходу, що призводить до додаткової інжекції носіїв заряду з емітера в базу та далі в колектор. Це додатково збільшує вихідний фотострум пристрою. Фототранзистори в одному пристрої об'єднують здатність захоплення світла в емітерному $p-n$ -переході при зворотному зміщенні (як в фотодіодах) та функцію посилення сигналу (як в фоторезисторах), тому мають вищу оптичну здатність виявляти слабкий оптичний сигнал та нижчий рівень шуму порівняно з фоторезисторами та фотодіодами.

Основними перевагами лавинного фототранзистора є велике посилення фотоструму $G_{\text{PT}} \sim 20$. Фототранзистору потрібна стабільна зовнішня напруга живлення для точного фіксування робочої точки при отриманні лінійної вихідної характеристики. Недоліками фототранзистора є сторонні шуми у вихідному сигналі, недостатня робоча частота f_{max} , залежність вихідного струму від зовнішньої температури. Крім того, фототранзистор може споживати багато енергії. Для підвищення ефективності поверхню бази сучасних фототранзисторів вдосконалюють шляхом створення на ній спеціальних комплексів для поліпшення захоплення фотонів.

Оптоелектроніка на основі квантових точок (КТ) привернула значний інтерес для широкого використання завдяки своїм унікальним фотофункціональним можливостям, таким як чудовий коефіцієнт оптичного поглинання, здатність регулювати ширину забороненої зони залежно від довжини хвилі падаючого світла та простоту рішень для вдосконалення властивостей фотодетекторів. Проте вплив поверхні з квантовими точками на оптоелектронні властивості детектора залишається незрозумілим. У [8] описано результати експериментів з дослідження властивостей високочутливих гібридних фототранзисторів CdSe з квантовими точками, оброблених у розчині аморфно-оксидних напівпровідників з високоефективним фотоіндукованим транспортом носіїв заряду з використанням поверхневої функціоналізації лігандів молекулярних халькогенідів металів.

Двовимірні (2D) ламінати отримали значну увагу завдяки своїй унікальній кристалічній структурі та видатним оптичним і електричним властивостям у фотоелектричному детектуванні. Однак більшість 2D матеріалів дуже чутливі до навколишнього середовища. Адсорбації і пастки, що вводяться в процесі підготовки, негативно впливають на роботу пристроїв на основі цих матеріалів.

Розглядається нова конструкція фототранзистора із розширеним короткохвильовим інфрачервоним спектром поглинання (e-SWIR) на основі гетеропереходу InP із надгратками InGaAs/GaAsSb (T2SL) в якості поглиначів. Монолітне вирощування фототранзистора на підкладці InP має низку переваг, таких як властивість узгодження параметрів кристалічної решітки гетеропереходу з необхідною шириною забороненої зони фоточутливої області за рахунок використання системи матеріалів гетеропереходу на основі сполуки InP/InGaAs/GaAsSb.

У роботі [9] стверджується, що практичне застосування неорганічних фотодетекторів значно обмежене через багато недоліків, включаючи складні



виробничі процеси та низьку механічну гнучкість. У цієї роботи розглядається конструкція органічних фототранзисторів на базі нових фоточутливих органічних матеріалів. В висновках роботи стверджується, що нові органічні фототранзистори постають як потенційні конкуренти з вражаючими характеристиками продуктивності, такими як висока гнучкість і простота виготовлення, що робить їх придатними для електронних пристроїв наступного покоління.

Завдяки своїм оптичним властивостям і чудовій рухливості носіїв заряду галогенідні перовскіти металів були широко вивчені в області фотодетекторів для сонячних елементів. У перовскітних фотодетекторах їхнє високе оптичне поглинання та чудова квантова ефективність сприяють підвищенню чутливості та детективності.

Висновки

В роботі був проведений системний аналіз існуючих фотодетекторів, які можуть використовуватись в сенсорних мережах, з метою визначення найкращих серед них, для застосування. Показано, що на наш погляд найперспективнішими є фотодетектори: малошумний лавинний фотодіод на основі InP з нанорозмірними квантовими ямами в його базі та фототранзистори із розширеним короткохвильовим інфрачервоним спектром поглинання (e-SWIR) на основі гетеропереходу InP із надгратками InGaAs/GaAsSb (T2SL) в якості поглинача, тому, що вони мають більшу енергонезалежність, покращену швидкодію, та мають менший вплив з боку зовнішніх чинників.

Література:

1. Макаренко В. Технология LI-FI как альтернатива WI-FI. *Электронные компоненты и системы*. 2020. № 1. С. 46-51.
2. Li-Fi: Wireless data from every light bulb. Офіційний сайт Lifi.co. URL: <https://lifi.co/>.
3. Li-Fi – коммунікації с помощью света. Офіційний сайт виробничої фірми VD MAIS Ukraine. URL: <https://vdmiais.ua/news/inzhenernoe-chtivo-li-fi-kommunikatsii-s-pomoshhyu-sveta#>.
4. Dushaq G., Rasras M. Thin Film GaAs Photodetector Integrated on Silicon using Ultra-Thin Ge Buffer Layer for Visible Photonics Applications. *Asia Communications and Photonics Conference – International Conference on Information Photonics and Optical Communications (ACP-IPOC)*. 2020. V. FTu2E. P. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.1364/FIO.2020.FTu2E.5>.
5. Avrahamy R., Zohar M., Auslender M., Hava S. et al. Upmost Efficiency Mid IR Thin HgCdTe Photodetectors. *Asia Communications and Photonics Conference – International Conference on Information Photonics and Optical Communications (ACP-IPOC)*. 2020. V. JTu2D. P. 21-29. DOI: https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2020.JTu2D.21.
6. Liu J., Liu F., Liu H. et al. Mixed-dimensional CsPbBr₃@ZnO heterostructures for high-performance p-n diodes and photodetectors. *Nano Today*. 2021. V. 36. P. 101055-101069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.101055>.
7. Wang N. High-Performance GeSn Photodetector Covering All



Telecommunication Bands. *IEEE Photonics Journal*. 2021. V. 13. №. 2. P. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3065223>.

8. Kim J., Park J. B., Kim M. G., Park S. K. Correlation Between Surface Functionalization and Optoelectronic Properties in Quantum Dot Phototransistors. *IEEE Electron Device Letters*. 2021. V. 42. №. 4. P. 553-556. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3061948>.

9. Zhao C., Ali M. U., Ning J. et al. Organic single crystal phototransistors: Recent approaches and achievements. *Frontiers of Physics*. 2021. V. 16. P. 43202-43219. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02149>.

Abstract. *The paper examines the main problems of building sensor networks related to network energy consumption and the dependence of its operation on the throughput of base stations. One of the most important elements of the network are photodetectors, the operation of which affects the speed and density of information transmission. That is why the work discusses modern designs of light photodetectors, their main characteristics and disadvantages. The proposed photodetectors can improve the data transfer rate in modern sensor networks.*

The introduction discusses the design principles and architecture of sensor networks. The first part is devoted to the current state of networks and prospects for their development. The second part examines the designs and operating principles of various photodetectors. Based on an analytical comparison of their characteristics and properties, it is proposed to use certain of them as optimal for building sensor networks.

From a comparative analysis of photodetectors, in our opinion, the most promising photodetectors are: a low-noise avalanche photodiode based on InP with nanosized quantum wells in its base and phototransistors with an extended short-wave infrared absorption spectrum (e-SWIR) based on an InG heterojunction of absorber quality, because they have a higher energy independence, improved performance and are less influenced by external factors.

Key words: *sensor networks, base stations, bandwidth, photodetectors, speed, density, information transmission.*

Стаття відправлена: 19.12.2023 р.

© Марколенко П.Ю.



УДК 540

OVERVIEW OF HYDROGEN APPLICATION, PRODUCTION, STORAGE AND DISTRIBUTION IN THE CONTEXT OF UKRAINE

Himaieva K.

ORCID: 0009-0000-9181-156X

Zhuravska N.

Ph.D, as. prof.

ORCID: 0000-0002-4657-0493

Kyiv National University of Construction and Architecture

Abstract. Hydrogen energy has been rapidly gaining prominence of the past decades. Many new production pathways, applications, storage methods and distribution networks were developed because of this effort. Despite many of these technologies being in their early stages, there is a significant number of experimental projects and theoretical research that promise the introduction of low-cost hydrogen into the worldwide energy system. In the context of Ukraine, where a large proportion of energy infrastructure has been destroyed, hydrogen is considered to be a major potential export, with outlines calling for significant investment and installation of electrolyzers with a capacity of up to 10 GW to be installed in Ukraine. Ukraine has the potential to support up to 500 GW of "green" hydrogen electrolyzers. An overview of the main technologies for the production, storage and distribution of hydrogen, proposals for the development of joint Ukrainian-European projects in wartime are presented.

Key words: hydrogen, renewable energy, alternative fuel, Ukraine.

1.Introduction. The increasing global energy consumption poses a significant challenge for the worldwide community. In the past decade, primary energy use has risen by 21 thousand TWh. Furthermore, 81.79 % of energy consumption in 2022 was from fossil fuels, such as: coal, oil and natural gas [1].

It is widely recognized by the scientific community, that energy production is the leading cause of greenhouse gas (GHG) emissions, especially CO₂ [2]. Multinational action is being taken against climate change, consisting of improving energy efficiency, reducing energy consumption and, most importantly, deploying variable renewable energy sources (VRES) [3]. The sharp growth in the share of VRES in electricity generation globally over the last 30 years can be seen in Fig. 1. Technologies such as photovoltaic cells and wind turbines have proven to be the future of electricity generation. However, a major issue concerning the use of VRES relates to the need for costly storage in low-generation periods [4], and lackluster viability of electric vehicles (EV) due to their limited range [5]. A potential solution for these problems is hydrogen.

Even though hydrogen is the most abundant element in the universe [6], its presence in the pure form is limited on Earth in quantities at around 500 parts per billion in the atmosphere [7]. In recent years, an increasing number of studies have been conducted into hydrogen as an energy carrier in a low-carbon economy due to its high heating value (120MJ/kg) and its only combustion product being water [8]. Presently hydrogen is predominantly used in the chemical industry as a reactant and is well an established aerospace propellant, but it is being evaluated for its use as fuel for internal combustion engines, use in fuel cells and applications in municipal central heating [9]. Moreover, hydrogen can be easily produced through electrolysis



and combusted in a gas turbine when VRES energy output is low, and demand is high (Fig. 2) [10]. Apart from electrolysis, there are many promising H₂ production methods which will be investigated in this paper. Despite hydrogen’s potential, there are many substantial challenges connected with the inefficiency of electrolysis, its low volumetric energy content and safety hazards due to its extreme flammability [11]. In the context of Ukraine hydrogen may become an invaluable complement to the after-war energy system. Over the course of the war, 40 % of the centralized energy infrastructure in Ukraine has been destroyed and needs to be rebuilt [12]. It makes little sense to reconstruct the Ukrainian energy system using fossil fuels as the main driver for its operation, when VRES are becoming more and more commonplace in energy systems around the world, hence many companies are seeking investment into construction of carbon-free power plants and related projects.

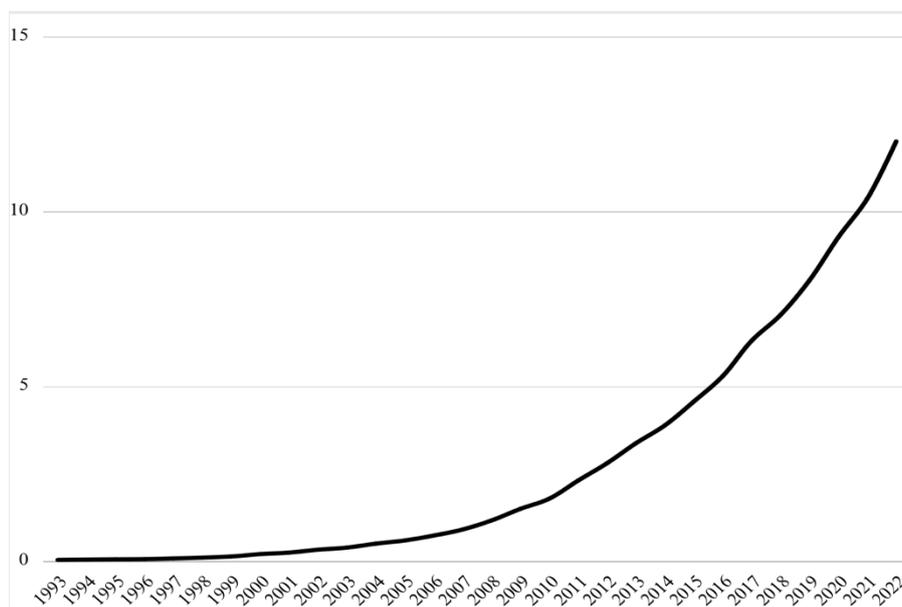


Fig. 1 - Renewable energy share 1993-2022 (%).

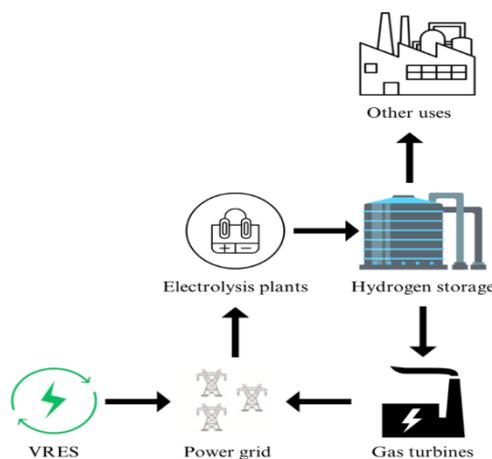


Fig. 2 – Hydrogen VRES storage. can

Plans for hydrogen production in Ukraine and export abroad have been drawn up in 2021 [13] and the Ukrainian company MCL has launched an experimental wind



power plant with the aim of producing hydrogen via electrolysis [14]. The number 1 roadblock in the way of hydrogen energy proliferation is the lack of investment and the reluctance to replace existing energy systems [15], but in Ukraine a unique opportunity is formed for foreign investors to test cutting edge technologies and develop models for global application operating on experience gained in Ukraine. To encourage investment, every opportunity and challenge must be analyzed, an overview of, and suggestions regarding applications, production methods and problems related to hydrogen in the Ukrainian energy systems is the purpose of this paper. Firstly, this paper will consider both current and potential applications of hydrogen, then it will provide an overview of hydrogen production methods, storage and distribution challenges, and finally will provide a complex of suggestions for the development of Hydrogen energy.

2. Applications of hydrogen. Hydrogen was used in a range of fields from as early as the first half of the 19th century [16]. Nowadays, hydrogen is widely produced and used in several different industries, however, its utilization in the energy industry so far only be considered experimental. Most hydrogen applications have not yet reached commercial scale due to the significant challenges and a lack of technological background, but as governments and enterprises around the world recognize the potential of H₂, the amount of research into the topic is steadily increasing [17].

Current applications. Agriculture. One of the most important ingredients in nitrogen-based fertilizers is ammonia [18], which is produced via the Haber-Bosch process described in Eq. 1.



Agriculture is one of the most important types of human activity, and in Ukraine it accounted for 41 % of exports in 2021, making this use of hydrogen unquestionably ingrained in the current Ukrainian economy [19].

Metallurgic industry. Metallurgy is also a major source of hydrogen demand, especially in reduction of ores into metals. The first and foremost utilization of H₂ is in production of crude iron by utilizing the reducing properties of gaseous hydrogen. Such technology has been proved to work best with pure hydrogen, yielding a 98 % rate of product metal recovery. Another, less widespread application of hydrogen is the production of 3000 °C oxygen-hydrogen flames that are used to melt thermally resistant metals and ores. As demand for high melting point metals increases, this hydrogen utilization may become vital for technological and economic development. In Ukraine, at pre-war rates over 20 million tons of pig iron and crude steel were produced annually [20, 21]. Many of the metallurgic enterprises such as Azovstal were destroyed as a result of the war and in, the context of a potential increase in hydrogen production, reconstruction with novel hydrogen reduction technologies may be a priority. Even if a shift to the use of pure hydrogen is deemed to be economically unviable metallurgy, gaseous mixtures containing H₂ are certain to be used.

Aerospace propulsion. Hydrogen-oxygen mixtures are commonplace in rocket propulsion due to the high energy produced by burning such fuels. More specifically, liquid hydrogen (LH₂) is used as combustible fuel and liquid oxygen (LOX) is used as an oxidizer for the reaction. The tremendously high specific impulse of LH₂ – LOX



fuel allows for creation of high-speed water vapor that propels the rocket [22]. In aviation, the use of hydrogen fuels so far has been limited to experimental and theoretical. However, as the push for green aviation is becoming stronger and stronger, fuels such as kerosene, which is derived from fossil fuels, are due to be replaced by carbon-neutral propellants. Hydrogen's only combustion by-products are steam and nitrogen oxides (NO_x) making it significantly cleaner than current options, and its energy density is highest among widely researched fuels [23], but due to its low volume density, H_2 has to be compressed or cooled to be used efficiently. These processes are extremely energy intensive and are not developed on a scale required to be implemented into commercial aviation yet [11]. Aerospace sector in Ukraine has collapsed after the Russian invasion, and no plans for continuation of commercial flights have been drawn up yet [24]. Despite this, companies such as Antonov may, with proper management, become a major component of the Ukrainian economy and develop novel technologies in the sphere of aviation, hydrogen fuels included.

Potential applications. Transportation.

Hydrogen powered vehicles, along with EV, are the crux of the transition to environmentally friendly personal and cargo transport. It is expected that the share of EV in light-duty vehicles will rise to 58 % by 2050, however, heavy-duty vehicles are unlikely to adopt the use of conventional battery-motor setup, due to a higher energy demand. Hydrogen technologies may be utilized to fill this gap [3].

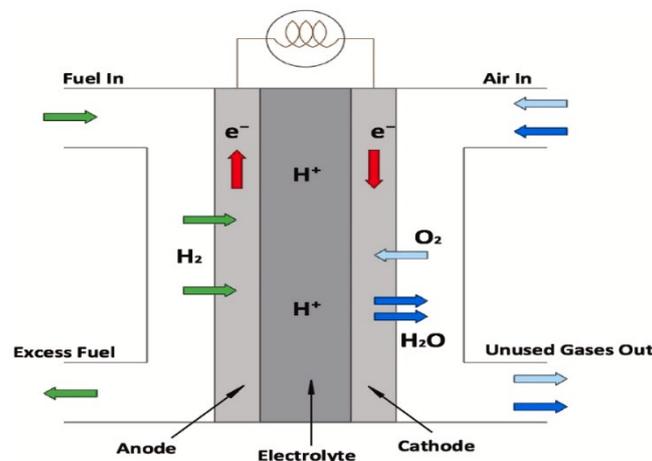


Fig. 3 – FC operation principle

The most promising hydrogen-based technology in transportation are fuel cells (FC). Similar to a battery, a fuel cell is a device that converts chemical energy into electricity or heat, but it is different in that it does not use internal energy of its materials, but rather a constant stream of hydrogen and oxygen. This is advantageous, because lengthy EV charge times are replaced by relatively fast hydrogen refueling. Polymer Electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) is the most common types of FC. Its three main components are anode, cathode and electrolyte that are used to generate electricity by using H_2 and O_2 (Fig. 3). Currently, all types of hydrogen FC are in the early stages of development and require face major challenges such as: high operating temperatures, low power output, short lifetimes and high production and operations costs. Significant research and investment are needed to make FC viable



commercially. Despite the roadblocks, Volvo, Toyota, Daimler, and hundreds of startups are developing and have released prototypes for hydrogen powered trucks and other heavy-duty transport. In addition, to land-based vehicles, hydrogen is being considered as a clean fuel for ocean-going ships in order to reduce shipping-related emissions. In 2018 international shipping accounted for 1.2 % percent of global emissions but is expected to sharply rise to 18 % by 2050. Utilization of direct hydrogen combustion engines or fuel cells in marine vessels would be an important step in accommodating the growing international economy. Several major engineering challenges need to be overcome, such as fuel storage, energy density and safety risks, before hydrogen can be used to power ships on a large scale [25-31].

Electricity generation. The use of hydrogen in electricity generation has so far been very limited since it takes more energy to electrolyze water than is produced when H_2 is burned, although the margin is relatively small – 3.55 kWh/m³ for generation and 3.3 kWh/m³ for combustion [11]. While, other methods of hydrogen production may be more sensible for direct electricity production, electrolysis using VRES is considered to be the most viable option for large-scale use of H_2 as an energy carrier. On the other hand, it is argued that direct use of power generated by VRES is favorable. However, it is important to take into account the fact that VRES are variable and constant generation is not guaranteed. One of the proposed solutions are hybrid renewable energy systems (HRES), which consists of a conventional petroleum-based generator and VRES. This approach accounts for intermittent power production, but it is reliant on the use fossil fuels. While creating HRES systems may be a temporary solution for energy systems globally, it is not a carbon zero method and cannot be adopted in the long term, therefore, an environmentally friendly electricity storage technology must be implemented into green energy systems. The most popular approach are lithium-ion batteries which provide a low cost per cycle storage and are a very well-established technology, accounting for 85.6 % of energy storage in 2015. The production of lithium metal carries serious environmental risks at every stage of the life cycle, from extraction to waste disposal. Lithium is an extremely limited resource on Earth, 9 countries of the world produce this metal, 53.2 % - Australia, which creates geopolitical and economic tensions [34]. Hydrogen is proposed as a substitute for traditional batteries for the storage of RES electricity [32-34].

Hydrogen is a key element of the future carbon-free energy system due to its energy and environmental properties, it has a high calorific value, does not form pollutants except water and nitrogen oxides (NO_x), is non-toxic, and its production methods have been in the focus of the scientific community and private enterprises for decades. In periods of high generation excess electricity is used to electrolyze water into H_2 and O_2 , hydrogen is then stored until power output drops and supplemental energy sources are needed. Combustion of hydrogen in a gas turbine is a sparsely researched topic, but it has been shown that hydrogen combustion provides a similar to natural gas power output, efficiency and can be engineered in a way to comply with NO_x emissions [35]. The most major problem with hydrogen in VRES system is storage, since H_2 under normal conditions cannot be stored efficiently. Like for transport applications, compression or cooling are possible solutions for this issue.



Overall, hydrogen has a potential in VRES systems, but many experimental systems must be built to determine the best configuration.

Municipal heating. Building heating systems accounted for 11 % of global GHG emissions in 2021, largely due to the use of natural gas or other fossil fuels as a driver for municipal heating. Consequently, an interest in alternative systems has been taken by the wider public. Electricity based systems such as the heat pump, which uses electricity to transfer heat to needed spaces, or direct electric heaters are promising, but provide less utility compared to natural gas. Hydrogen has the potential to restructure the building heating industry. While large-scale pure hydrogen storage and distribution is unfeasible, due to infrastructure limitations and safety concerns, blending of hydrogen into natural gas networks is a promising idea for reducing GHG emissions. An example of such a project is HyDeploy in the UK, which used a mixture of 20...80 % natural gas to heat 133 buildings on the territory of Keele University. The project has demonstrated that a 20 % injection of hydrogen into heating systems is safe and efficient [36-39]. Even though the concept of hydrogen municipal heating has been proven experimentally, it is essential to take into account the fact that this approach does not eliminate GHG emissions completely, but rather dampens the impact. Furthermore, the cost of green hydrogen is far too high compared to natural gas to be viable [30].



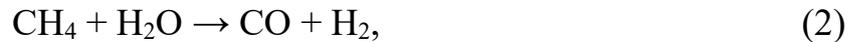
Fig. 4 – Hydrogen color spectrum

3. Production pathways. For extensive integration of hydrogen into world energy systems, it must be produced at a much larger scale compared to current amounts (90 million tons annually [40]). Additionally, new ways of production must be explored, as currently prevalent methods rely exclusively on fossil fuels and are not suitable for a carbon free economy. Research into hydrogen production pathways is becoming more and more abundant, hence more and more methods are being proposed and evaluated for their viability. Both established and emerging hydrogen production methods and their relevant colloquial nicknames are presented in Fig. 4 [41]. This section of the paper will provide an overview for the most promising methods and analyze their viability for use in Ukraine.

Hydrocarbons reforming. Currently most of the world’s commercial hydrogen production comes from fossil fuels, more specifically from steam methane reforming



(SMR). This technology is considered to be mature in the petrochemical industry and is believed to be at its theoretical limits of efficiency. The SMR process consist of several steps, the main ones being stem reforming of methane into carbon monoxide and hydrogen (Eq. 2), and water-gas shift of carbon monoxide into carbon dioxide and hydrogen (Eq. 3).



Further hydrogen is purified as needed by using pressure swing adsorption (PSA), or amine scrubbing [42]. The SMR process yield efficiency is estimated to be 74 % and the cost is \$1.8 (64¢) kg^{-1} [9]. However, while this process is economically viable for H_2 production it is unsuitable for a carbon-neutral economy, as the main byproduct of SMR is CO_2 with a production rate of 10-15t $\text{CO}_2/\text{t H}_2$ [43]. This deficiency can be alleviated by using carbon capture and storage (CSS). It is possible to store separated CO_2 underground in depleted oil and gas wells, aquifers, or in the liquid form using dedicated facilities. Even though, CSS is a promising technology, but it is important to consider that a 15% efficiency drop is associated with implementing CSS [44]. Furthermore, it should be considered that the petrochemical industry may be interested in continuing to supply hydrocarbons under the mask of CSS and a complete shift from fossil fuels would be the only true way to mitigate climate change.

In Ukraine hydrogen is mostly produced through SMR for the production of ammonia-based fertilizers. In 2021 2.1 million tons of ammonia were produced and, at a rate of 180 kg H_2 per ton of NH_3 it can be approximated that the pre-war annual hydrogen production in Ukraine was 360 thousand tons [45], this translated to almost 4 million tons of CO_2 released into the atmosphere, which accouns for 2 % of annual GHG emissions in Ukraine [46]. It is clear that there is established demand for hydrogen in Ukraine, but current methods of production do not allow for expansion of applications, as using SMR derived hydrogen for energy would be neither cost-effective, nor environmentally friendly, hence other H_2 production pathways must be explored to create a sensible development plan for Ukraine.

Water electrolysis. Undoubtedly, the most widespread developing hydrogen production technology is water electrolysis. Crucially, renewable energy has been recognized by the general public as one of the solutions to climate change and most countries around the world are engaging in both internal and international projects to develop renewable energy infrastructure, therefore, VRES are believed to be the future of the world energy system. However, as mentioned in section 2, “green” energy storage is the main roadblock for system wide VRES implementation. It is proposed that storing electricity in the form of hydrogen may become an important way of mitigating this VRES flaw. Furthermore, if electrolysis facilities are created, hydrogen can, relatively easily, be directed into the production of FC or used in the chemical industry. The water electrolysis reaction is described in Eq. 4.



Product hydrogen purity depends on the purity of water used in the process, so high concentration of H_2 needed for FC and other processes can be achieved through water purification before electrolysis [47]. It is essential that electrolysis is performed



using carbon-free electricity, since electricity from mixed grid sources may produce up to 1.5 times more pollution compared to SMR during hydrogen production [43]. Another problem that must be considered is that 80 % of the products by mass is oxygen, considering that production of hydrogen is expected to reach 660 million tons by 2050 [48], largely fueled by VRES, 2.4 billion tons of additional O₂ will be produced. Presently, oxygen is widely used in the medical and metallurgic industries, however, the demand for oxygen is not sufficient to use the excess O₂ from electrolysis, therefore, unless new fields for large-scale oxygen use are found, it would have to be released into the atmosphere, decreasing the overall economic viability of the process.

Ukraine is considered to have an enormous potential for hydrogen production through electrolysis. It has been estimated that up to 45 million tons of “green” hydrogen can be produced in Ukraine [49], however, for this level of production to be possible, over 500 GW worth of VRES generation would need to be installed in Ukraine [45]. The possibility of large-scale electrolysis facilities in Ukraine has been recognized by the European community through the Green Hydrogen for a European Green Deal: 2x40 GW Initiative. This 2020 document developed by Hydrogen Europe outlines the possibility of installing electrolyzers with combined capacity of 10 GW in Ukraine with 80 % of hydrogen production being oriented for export to Europe and 20% allocated for sustainable ammonia fertilizer production [50]. Several hydrogen production projects developed by Ukrainian companies exist and most of them focus on the scheme VRES → Hydrogen → Ammonia. An example of such a project is the development of a wind energy facility “Volodymyrets” by the energy consultant firm MCL. The project’s goal is installation of 72 MW wind turbine array with the goal of electrolyzing water into hydrogen. Another company focused on “green” H₂ synthesis is LLC “Argus service”, it proposes a photovoltaic solar power plant with a capacity of 125 MW dedicated to water electrolysis. Both projects plan to convert the hydrogen produced into ammonia for fertilizer production, however, if such projects are a success, a broader utilization of H₂ in Ukraine is bound to follow [48-50].

Natural hydrogen extraction. The vast majority of current hydrogen projects focus solely on producing hydrogen through different chemical processes; however, an emerging field of study is natural geological hydrogen that can be extracted using technology similar to established fossil fuels extraction methods. It is estimated that 20 million tons of hydrogen is released yearly from the earth with even larger volumes trapped underground, with concentrations of hydrogen reaching 98 %. Natural hydrogen deposits could potentially supply 1000 million tons per year for 100 000 years, although such estimation is only theoretical, it puts the amount of hydrogen underground into perspective. Furthermore, it has been approximated that natural hydrogen could account for 85 % of global production, provided sufficient investment is present. The equipment needed to extract natural hydrogen is very similar to that used in gas extraction, hence, the investment needed to begin H₂ mining is significantly lower than that which is needed for “green” hydrogen. The equipment needed to extract natural hydrogen is very similar to that used in gas extraction, hence, the investment needed to begin H₂ mining is significantly lower



than that which is needed for “green” hydrogen. Companies focused on extracting hydrogen from the ground are already in present, Helios Aragon in Spain and Gold Hydrogen in Australia have already achieved sizable H₂ extraction with a cost comparable to that of SMR. Natural hydrogen production exists in Ukraine, 11 significant hydrogen deposits with a concentration of up to 80 %. Additionally, this field of study is being investigated by Ukrainian scientists, studies by Bahrii I. et al 2022 [53], 2023 provide insight into occurrence of hydrogen as a part of hydrocarbon wells. Little progress in term of creating plans for extracting geological hydrogen in Ukraine has been done so far, but it is a promising field of research [51-54].

Natural gas pyrolysis. Another developing hydrogen production pathway is fossil fuel thermal decomposition, also known as pyrolysis. Like SMR, thermal decomposition of methane (TDP) is grounded in existing petrochemical technology, although due to a more complex process it has not been implemented on a scale similar to SMR. The principle of TDP is very simple, methane is thermally decomposed into carbon and hydrogen at temperatures above 700°C. (Eq. 5).



The advantage of TDP is the lack of direct GHG emission, potentially making the process carbon neutral [44]. However, several significant limitations of TDP must be considered. Firstly, by mass 75 % of products of the reaction is carbon and, similar to the issue with oxygen oversupply from electrolysis, there is no sufficient demand for such amount of carbon, considering current demand for hydrogen (90 million tons), if all of it were produced through TDP, 270 million tons of solid carbon would be produced, which is 13...18 times more than current global annual carbon demand [43]. This issue can be solved by introducing pyrolyzed carbon into soil, which has been shown to increase soil fertility, especially in Chernozems which are extremely widespread in the south of Ukraine [55]. The second problem connected with TDP is interconnected with the argument that CSS is a tool for petrochemical companies to stay in business in a climate-conscious world. TDP may be presented to the public as a remedy for GHG emissions, while fossil fuels keep being extracted and used.

For Ukraine TDP can become an alternative for SMR, however, replacing established fossil fuel-based hydrogen production infrastructure with another type of hydrocarbon dependency would not be sensible, when truly environmentally friendly technologies like VRES have been proven to be effective for H₂ synthesis.

Nuclear energy utilization. Nuclear energy, despite its poor reputation caused by accidents such as Chernobyl and Fukushima, is believed to be one of the cleanest and most environmentally friendly options available [56]. It has been proposed that byproduct heat from nuclear power plants can be used in thermochemical water-splitting reactions. Canada, China, and Japan have developed nuclear to hydrogen systems that use primary or secondary heat from a nuclear reactor to thermolyze water into H₂ yielding a cost per kilogram of \$2.7/kg H₂ (20...45 % cheaper than conventional electrolysis), although these projects did not consider storage and transportation cost [57]. However, nuclear energy is not favored by the general public, hence little development or investment has been done into nuclear power plants.

Ukraine relies heavily on nuclear power, as 58 % of Ukrainian electricity



production in 2022 was from nuclear energy [1], and due to Russian attacks on the Ukrainian energy system nuclear is expected to stay an integral component of Ukrainian energy system. Existing nuclear power plants in Ukraine would require extensive and expensive modifications to allow for hydrogen production, and due to Europe's reluctance to accept nuclear energy as an invaluable component of the world energy system, it is unlikely that significant foreign investment will be present, making full-scale nuclear hydrogen unlikely.

Waste and biomass pyrolysis. The world municipal waste production has been rapidly increasing for the past decades and, if current trends stay the same, by 2100 it is projected to reach 4 billion tons a year [58]. Consequently, recycling, and other waste disposal methods are needed to avoid an environmental catastrophe. Waste to energy model has gained quite some prominence due to its efficiency and many projects around the world have been developed. It is estimated, that in 2019 approximately 19% of municipal waste was incinerated and 9 % recycled leaving the remaining 72 % to lay in landfills and contaminate the environment [59]. It is proposed that organic waste can be pyrolyzed into syngas, a combination of CH_4 , CO , CO_2 and H_2 , which can be combusted for energy. The principle of this process is similar to TDP in that more complex organic compounds are broken down into their simple components at high temperatures ($700\text{...}1000^\circ\text{C}$). This method, although not carbon zero is significantly less harmful to the environment and may aid the world energy system in the transition from fossil fuels [60].

Ukraine has a significant waste management problem, as 45 million m^3 of waste is produced annually, with the vast majority of it ending up in unsanitary and often severely mismanaged landfills and dumps [61]. Odessa landfill may become an example of successful waste management and disposal. In 2019 degassing systems were installed at Odessa landfill with a capacity of 3 MW. Through pyrolysis of organic matter, which accumulates at the Odessa landfill at the rate of 157 000 tons per year, syngas is produced and then either burned for energy or separated and sold. This method is capable of producing at least 1 kg of hydrogen per 10 kg of biomatter [62]. If such systems are implemented on a wider scale, they can not only lessen the problem of waste accumulation in Ukraine, but also synthesize hydrogen from organic matter with a ration of at least 1 ...10.

Hydrogen storage. Hydrogen in the under normal conditions is a gas with a density of 0.082 kg/m^3 [63], making its storage highly space inefficient, and rendering gaseous H_2 practically unusable in vehicles. To alleviate this problem several ways of compressing hydrogen were developed, including mechanical compression, liquefaction and geological storage, as well chemical methods such as conversion into ammonia, metal hydrides, formic acid or carbohydrates. Hydrogen compressed at pressures between 25...70 MPa, however, for industrial applications H_2 is usually stored in metallic cylinders at 20...30 MPa to achieve the lowest cost. For applications in vehicles 70 MPa is considered optimal, requiring the use of costly carbon fiber composite pressure vessels, and incurring an energy penalty of at least 7 % [64]. To achieve reliable and cost-effective hydrogen compression more research must be done into long term storage and the impact of operating conditions of the materials [65]. An alternative to compression is liquefaction at temperatures below



to 30K [9]. It is considered the most space effective option, offering a density of 70 kg/m³ [66], and has achieved technological maturity. On the other hand, liquefaction incurs an energy penalty of over 30 % [64]. Furthermore, it is important to consider that liquid hydrogen vessels must be well insulated, adding to capital costs, and continuously refrigerated, adding to operational costs. Liquid hydrogen storage is not suitable for commercial applications and should be used exclusively when no other option is available.

Among chemical storage, metal hydrides provide by far the highest hydrogen density ranging from 70 kg/m³...150 kg/m³ [9]. Although, metal hydrides incur an energy penalty moderately higher than hydrogen compression and thus, a higher cost [31]. Therefore, even though both of these technologies have the potential for efficient H₂ storage, it must be considered which of the two methods is more sensible in a given case. Ammonia is also a candidate for hydrogen storage and transportation. It is uniquely suited for Ukraine, as most current production and even developing projects mentioned in section 3.2 focus on converting H₂ into ammonia for either fertilizer production, or more efficient storage and distribution. Ammonia production is approximately 1.3 times more expensive than hydrogen, however, storage of NH₃ is almost 30 times more cost effective than hydrogen, making it very well suited as a hydrogen-derived energy carrier [67]. Despite these incredible advantages, ammonia is incredibly toxic to humans and produces NO_x in the process of combustion [3]. Therefore, more research is required to mitigate these issues.

Storage of hydrogen can also be performed without physical or chemical modification of the gas through underground storage. A number of human-made and natural geological formations can serve as spaces for H₂ storage, more specifically depleted natural gas and oil wells, aquifers, salt caverns, abandoned mines and rock caverns [10]. A 2016 study analyzed the potential for geological hydrogen storage in Poland, it has identified 26 sites in the Carpathian fore deep and the Carpathians proper, it can be inferred from this study, that Ukrainian Carpathians must also have a high potential for underground hydrogen storage. However, proper surveys must be conducted to determine the possibility of hydrogen storage in the Ukrainian Carpathians [68].

Hydrogen distribution. The problem of cost and space-effective hydrogen distribution is closely related to hydrogen storage. The problems being low volumetric energy density and high cost of transportation if traditional hydrogen storage technologies are used. Hydrogen gas pipelines have already been tested and proven as a viable distribution method, as 3000 kilometers of high-pressure hydrogen pipes have been installed in Europe [64]. Compressed hydrogen can be transported by trucks and delivered directly to a refueling station without the need for intermediate distribution nodes [69]. Furthermore, hydrogen can and is transported overseas by using conventional tanker ships [70]. While these methods are undoubtedly viable for certain situations, converting hydrogen into ammonia allows for transportation by using practically the same technology as that which is used for natural gas, although additional safety measures must be installed to mitigate ammonia's toxicity. Hydrogen energy has the potential to revolutionize the world energy industry, by providing a cost-efficient method for VRES-generated electricity storage and making



clean transportation possible by utilizing FC technology. Water electrolysis has now practically reached technological maturity and can be safely implemented without the risk of investment loss. Other H₂ production pathways need significantly more research and experimental projects to reach commercial scale. Storage and distribution remain the main roadblocks on the way to a hydrogen economy, but more and more solutions are being proposed and some of them, such as hydrogen pipelines and hydrogen tankers have already been proven to be effective method of distribution. Chemical storage of H₂ promises high efficiency and low cost but has serious flawed connected with safety and commercial implementation, hence, more research and testing are needed.

In Ukraine, there is a major hydrogen market directed at ammonia fertilizer production, with most of the hydrogen being produced through SMR, but the potential for “green” hydrogen is immense and recognized by European investors. Ukraine can provide low land and labor costs together with a high energy yield; however, the current war deters investors from engaging with Ukrainian projects. It is unlikely that this fear of losing their investment will disappear fully until the war is over, hence, Ukrainian companies and startups must develop comprehensive, low-risk and appealing projects for investors. It is possible that dispersed VRES such as photovoltaic could be paired with low-scale electrolysis plants to reduce the risk of complete system destruction in case of a Russian attack on the facility. Natural hydrogen extraction projects cannot be reduced in scale and still remain viable, however many of H₂ formations occur in regions with already developed mining infrastructure, therefore it should be possible to begin extraction with relatively low capital costs. Conversion of hydrogen into ammonia may be significantly more dangerous, as refineries capable of such processes are generally not scalable and are a greater target for attack. Hydrogen storage must be decentralized to avoid destruction similar to that of oil storage facilities. Compressed hydrogen could be transported and stored by trucks domestically, and by exported to high-demand European countries via train, although this would require creating either construction of compression facilities or conversion of H₂ into NH₃. Hydrogen pipelines are a possibility, but in order to reduce the risk of complete destruction, they would need to be low scale, at least until crossing the border into the European Union. These propositions should be evaluated by the scientific community and investigated by Ukrainian developers interested in attracting European investment in wartime. The most important component of this investigation should be the creation of proof-of-concept production and distribution projects that would bring theoretical models to life, so that it can be scaled with relative ease. Furthermore, it is essential that Ukrainian and Global scientific communities engage in deeper collaboration to provide both the needed data and capabilities to analyze it and develop realistic models for hydrogen energy in Ukraine.

Thus, an overview of hydrogen applications in agriculture, metallurgy, transport, renewable energy storage and municipal heat supply, hydrogen production routes such as SMR, water electrolysis, geological hydrogen production, TDP, nuclear thermolysis and pyrolysis of organic waste is presented. Additionally, H₂ storage utilizing physical and chemical manipulation and the possibility of underground



storage were investigated, together with relevant distribution methods. Finally, several suggestions for developing Ukrainian hydrogen economy in the conditions of war were proposed, more specifically, focusing of dispersed facilities and expanding Ukraine-Europe scientific and commercial cooperation. Further research could focus on economic analysis of different steps of hydrogen production in Ukraine, surveying potential production sites and developing models for hydrogen delivery to Europe. The production of hydrogen through the use of solar energy or other renewable and safe sources can be considered promising [71, 72].

References

1. Energy Institute, 2023. *Statistical Review of World Energy*. [online] Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>.
2. Höök, M., Tang, X., 2013. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*, [e-journal] 52, p. 797. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>.
3. Stançin, H. et al, 2020. A review on alternative fuels in future energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal] 128, p. 109927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109927>.
4. Denholm, P. et al, 2010. *The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. Technical Report*. [online] Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf>.
5. Kim, S., Lee, J., Lee, C., 2017. Does Driving Range of Electric Vehicles Influence Electric Adoption? *Sustainability*, [e-journal] 9, p. 1783. <http://dx.doi.org/10.3390/su9101783>.
6. Grochala, W., 2015. First there was hydrogen. *Nature Chemistry*, [e-journal] 7, p. 264. <https://doi.org/10.1038/nchem.2186>.
7. Renewable Matter, 2021. *Natural Hydrogen: A Geological Curiosity or the Primary Energy Source for a Low-Carbon Future?* [online] Available at: [https://www.renewablematter.eu/articles/article/natural-hydrogen-a-geological-curiosity-or-the-primary-energy-source-for-a-low-carbon-future#:~:text=Hydrogen%20is%20the%20most%20common,billion%20\(or%200.5%20ppm\)](https://www.renewablematter.eu/articles/article/natural-hydrogen-a-geological-curiosity-or-the-primary-energy-source-for-a-low-carbon-future#:~:text=Hydrogen%20is%20the%20most%20common,billion%20(or%200.5%20ppm)).
8. Kyrychenko, V. I., Kyrychenko, V. V., Nezdorovin, V. P., 2022. The Problem of Hydrogen, Hydrogen and Atomic Hydrogen Energy: Physical, Chemical and Technological Aspects, Technical and Economic Analysis (Review). *Energotehnologii ta Resursozberezhennya. [Energy Technologies and Resource Saving]*, 3, p. 20.
9. Abdalla, A. M. et al, 2018. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, [e-journal] 165, p. 602. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>.
10. Elberry, A. M. et al, 2021. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 46, p. 15671. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.080>.
11. Karp, I. M., 2020. Hydrogen: Properties, Production and Uses. *Energotehnologii ta Resursozberezhennya. [Energy Technologies and Resource*



Saving], 2, p. 4.

12. Krutogolova I. O., Braverman V. Ya., Iliencko B. K., 2023. Heat Pumps as a Trend of Low-carbon Energy Development. *Energotehnologii ta Resursozberzhennya. [Energy Technologies and Resource Saving]*, 3, p. 35.

13. Slovo I Dilo [Word and Deed], 2021. *Vyrobnytsvo ta eksport vodnyu: yaki oblasti Ukrainy mayut naibilshyi potentsial [Hydrogen production and export: which regions of Ukraine have the greatest potential]* [online] Available at: <https://www.slovoidilo.ua/2021/10/05/infografika/ekonomika/vyrobnyctvo-ta-eksport-vodnyu-yaki-oblasti-ukrayiny-mayut-najbilshyj-potenczial>.

14. Ukrainska Enerhetyka [Ukrainian Energetics], 2022. *Ukrainski rozrobnyky vzhe hotovi proponuvaty vodnevi proekty investoram [Ukrainian developers are ready to offer hydrogen projects to investors]* [online] Available at: <https://ua-energy.org/uk/posts/ukrainski-rozrobnyky-vzhe-hotovi-proponuvaty-vodnevi-proekty-investoram>.

15. Ukrainsky Soyuz Promyslovtsiv i Pidpryemtsiv [Ukrainian League of Industrialists and Enterprises], 2023. *Potentsial Vyrobnytstva Zelenoho Vodniu v Ukraini Stanovy 505 MLN Ton Kubometriv: Shscho Potribno Dlya Rozvytku Tsoho Napriamu? [The Potential for Green Hydrogen Production in Ukraine is 505 MLN Tons of Cubic Meters: What is Needed to Develop this Area?]* [online] Available at: <https://uspp.ua/news/novyny-hromadskykh-partneriv/2018/potentsial-vyrobnytstva-zelenoho-vodniu-v-ukraini-stanovy-505-mln-ton-kubometriv-shscho-potribno-dlia-rozvytku-tsoho-napriamu>.

16. Cecil, M. A., 1820. *On the Applications of Hydrogen Gas to produce a moving Power in Machinery; with a Description of an Engine which is moved by the Pressure of the Atmosphere upon a Vacuum caused by Explosion of Hydrogen Gas and Atmospheric Air.* [online] Available at: <http://www3.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/projects/cecil/cecil.pdf>.

17. Rasul, M. G. et al, 2022. The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications. *Energy Conversion and Management*, [e-journal] 272, p. 116326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116326>.

18. Mostafaipour, A., Sedeh, A. S., 2019. Investigation of solar energy utilization for production and sustainable chemical fertilizer: A case study. *International Journal of Energy Research*, [e-journal] 43, p. 8314. <https://doi.org/10.1002/er.4829>.

19. Foreign Agricultural Service U.S. Department of Agriculture, 2022. *Ukraine Agricultural Production and Trade.* [online] Available at: <https://fas.usda.gov/sites/default/files/2022-04/Ukraine-Factsheet-April2022.pdf>.

20. Bilik, J. et al, 2013. Efficiency of hydrogen utilization in reduction processes in ferrous metallurgy. *Scientia Iranica*, [e-journal] 20, p. 337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2012.12.028>.

21. Ahapova, V., Vox Ukraine, 2023. *Ukrainian metallurgy after February 24: who will give the Atlas a shoulder to lean on?* [online] Available at: <https://voxukraine.org/en/ukrainian-metallurgy-after-february-24-who-will-give-the-atlas-a-shoulder-to-lean-on>.

22. Perry, B., Nasa Blogs, 2016. *We've Got (Rocket) Chemistry, Part 1.* [online]



- Available at:
[https://blogs.nasa.gov/Rocketology/tag/liquidooxygen/#:~:text=Liquid%20oxygen%20\(LOX\)%20serves%20as,creates%20one%20homogenous%20solid%20propellant.](https://blogs.nasa.gov/Rocketology/tag/liquidooxygen/#:~:text=Liquid%20oxygen%20(LOX)%20serves%20as,creates%20one%20homogenous%20solid%20propellant.)
23. Dincer, I., Acar, C., 2016. A review on potential use of hydrogen in aviation applications. *International Journal of Sustainable Aviation*, [e-journal] 2, p 74. <https://doi.org/10.1504/IJSA.2016.076077>.
24. Visit Ukraine, 2023. *World Flight Attendant Day: what is the state of Ukraine's civil aviation and where are Ukrainian planes and crews now?* [online] Available at: <https://visitukraine.today/blog/2226/world-flight-attendant-day-what-is-the-state-of-ukraines-civil-aviation-and-where-are-ukrainian-planes-and-crews-now>.
25. Department of Chemical Engineering and Biotechnology, 2023. *Fuel Cells*. [online] Available at: <https://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-eme/Edu/fuelcells>.
26. Ang, T. et al, 2022. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, [e-journal] 43, p. 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>.
27. Volvo Trucks, 2022. *Volvo Trucks showcases new zero-emissions truck*. [online] Available at: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2022/jun/volvo-trucks-showcases-new-zero-emissions-truck.html>.
28. Biddle, A., Toyota UK Magazine, 2023. *Hydrogen trucks: decarbonizing Toyota logistics*. [online] Available at: <https://mag.toyota.co.uk/hydrogen-trucks/>.
29. Daimler Truck, 2021. *Daimler Truck's hydrogen-based fuel-cell truck receives license for road use*. [online] Available at: https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-Trucks-hydrogen-based-fuel-cell-truck-receives-license-for-road-use.xhtml?oid=51714040&ls=L2VuL2luc3RhbmNIL2tvL0ZlZWwtQ2VsbHMueGh0bWw_b2lkPTkyNjU3ODImcmVsSWQ9NjA4MjkmZnJvbU9pZD05MjY1NzgyJnJlc3VsdEluZm9UeXBISWQ9NDA2MjYmdmllclR5cGU9dGh1bWJzJnNvcnREZWZpbml0aW9uPVBVQkxJU0hFRF9BVC0yJnRodW1iU2NhbGVJbmRleD0xJnJvd0NvdW50c0luZGV4PTUmZnJvbUluZm9UeXBISWQ9NDA2Mjg!&rs=7.
30. Lamb, W. F. et al, 2021. A review of trends and drivers of greenhouse gas emission by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*, [e-journal] 16, p. 073005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.
31. Hoang, A. T. et al, 2023. Technological solutions for boosting hydrogen role in decarbonization strategies and net-zero goals of world shipping: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal] 188, p. 113790. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113790>.
32. Deshmukh, M. K., Deshmukh, S. S., 2008. Modeling of hybrid renewable energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal] 12, p. 235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.011>.
33. Ould Amrouche, S. et al, 2016. Overview of energy system in renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 41, p. 20914. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243>.
34. Chaves, C. et al, 2021. Concerns about lithium extraction: A review and application for Portugal. *The Extractive Industries and Society*, [e-journal] 8, p.



100928. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100928>.

35. Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L., 2005. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, [e-journal] 127, p. 73. <https://doi.org/10.1115/1.1787513>.

36. Chua, K. J., Chou, S. K., Yang, W. M., 2010. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, [e-journal] 87, p. 3611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014>.

37. Jeong, J., Kim, C. S., Lee, J., 2011. Household electricity and gas consumption for heating homes. *Energy Policy*, [e-journal] 39, p. 2679. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.037>.

38. Karp, I. M., 2021. Hydrogen in municipal energy. *Energotehnologii ta Resursozberezhennya. [Energy Technologies and Resource Saving]*, 1, p. 23.

39. Isaac, T., 2019. HyDeploy: The UK's First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy*, [e-journal] 3, p. 114. <https://doi.org/10.1093/ce/zkz006>.

40. International Energy Agency, 2019. *The Future of Hydrogen*. [online] Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen#>.

41. National Grid, 2023. *The hydrogen colour spectrum*. [online] Available at: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>.

42. Barelli, L, et al, 2008. Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review. *Energy*, [e-journal] 33, p.554. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.018>.

43. Sánchez-Bastardo, N., Schlögl, R., Ruland, H., 2021. Methane Pyrolysis for Zero-Emission Hydrogen Production: A Potential Bridge Technology from Fossil Fuel to a Renewable and Sustainable Hydrogen Economy. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, [e-journal] 60, p. 11855. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01679>.

44. Steinberg, M., 1999. Fossil fuel decarbonization technology for mitigation global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 24, p. 771. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00128-1).

45. Kryl, Ia. et al, 2023. Status and Prospects of Renewable Hydrogen Use in Ukraine: Impact on Industry and Decarbonization Pathways. *Mineralni resursy Ukrainy [Mineral resources of Ukraine]*, [e-journal] 2, p. 12. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.12-16>.

46. Friedlingstein, P., et al, 2022. Global Carbon Budget. *Earth System Science Data*, [e-journal] 14, p. 4811. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>.

47. Shih, A. J. et al, 2022. Water electrolysis. *Nature Reviews Methods Primers*, [e-journal] 2, 84. <https://doi.org/10.1038/s43586-022-00164-0>.

48. Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2022. *Global Hydrogen Flows*. [online] Available at: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper3917>.

49. Barylo, A. A. et al, Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy [The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine], Ukrainian Hydrogen Council, 2020. *Atlas Enerhetychnoho Potentsialu Vidnovliuvanykh Dzherel Enerhii Ukrainy [Atlas of Energy Potential of Renewable Energy Sources in Ukraine]*. [pdf] Available at: <https://www.ive.org.ua/wp->



content/uploads/atlas.pdf.

50. Van Wijk, A., Chatzimarkakis, J., Hydrogen Europe, 2020. *Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 Initiative*. [pdf] https://dii-desertenergy.org/wp-content/uploads/2020/04/2020-04-01_Dii_Hydrogen_Studie2020_v13_SP.pdf.

51. Zgonnik, V., 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, [e-journal] 203, p. 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.

52. Blay-Roger, R. et al, 2024. Natural hydrogen in the energy transition: Fundamentals, promise, and enigmas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal] 189, p. 113888. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113888>.

53. Bahrii, I. et al, 2022. Scientific Justification of the Spatial Distribution of Anomal Manifestations of Hydrogen to Solve Energy and Environmental Problems. *Mineralni resursy Ukrainy [Mineral resources of Ukraine]*, [e-journal] 1, p. 24. <https://doi.org/10.31996/mru.2022.1.24-28>.

54. Bahrii, I. et al, 2023. Scientific Justification of Spatial Distribution and Mapping of Anomalous Manifestations of White Hydrogen – Energy Raw Material of the XXI Century. *Mineralni resursy Ukrainy [Mineral resources of Ukraine]*, [e-journal] 1, p. 4. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.1.4-10>.

55. Glaser, B. et al, 2002. Potential of Pyrolyzed Organic Matter in Soil Amelioration. 12th ISCO Conference, Beijing, People's Republic of China, 26-31 May 2002. [pdf] Available at: <https://topsoil.nserl.purdue.edu/isco/isco12/VolumeIII/PotentialofPyrolyzedOrganic.pdf>.

56. Brook, B. W., Bradshaw, C. J. A., 2014. Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation. *Conservation Biology*, [e-journal] 29, p. 702. <https://doi.org/10.1111/cobi.12433>.

57. El-Emam, R. S., Khamis, I., 2019. Advance in nuclear hydrogen production: Results form an IAEA international collaborative research project. *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 44, p. 19080. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.012>.

58. Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., Kennedy, C., 2013. Environment: waste production must peak this century. *Nature*, [e-journal] 502, p. 615. <https://doi.org/10.1038/502615a>.

59. OECD, 2019. *Plastic waste by region and end-of-life fate*. [online] Available at: https://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?datasetcode=PLASTIC_WASTE_5&lang=en.

60. Foong, S. Y. et al, 2021. Progress in waste valorization using advanced pyrolysis techniques for hydrogen and gaseous fuel production. *Bioresource Technology*, [e-journal] 320, p. 124299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124299>.

61. Makarenko, N., Budak, O., 2017. Waste management in Ukraine: Municipal solid waste landfills and their impact on rural areas. *Annals of Agrarian Science*, [e-journal] 15, p. 80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2017.02.009>.

62. Braverman, V. Ya., Krusch, I. B., Savchuk, S. D., 2021. Hydrogen Production System from the Organic Part of the Odessa Landfill Solid Waste.



Energotechnologii ta Resursozberezhennya. [Energy Technologies and Resource Saving], 1, p.40.

63. Royal Society of Chemistry, 2023. *Hydrogen*. [online] Available at: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>.

64. Staffell, I. et al, 2019. The role of Hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, [e-journal] 12, p. 463. <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>.

65. Barthelemy, H., Weber, M., Barbier, F., 2017. Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 42, p. 7254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>.

66. Niaz, S., Manzoor, T., Pandith, A. H., 2015. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [e-journal] 50, p. 457. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>.

67. Kojima, Y., 2013. A Green Ammonia Economy. 10th Annual NH₃ Fuel Conference, Hiroshima, Japan, 22-25 September 2013. [pdf] Available at: <https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2019/12/nh3fcx-yoshitsugu-kojima.pdf>.

68. Tarkowski, R., 2017. Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 42, p. 347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.136>.

69. Ball, M., Weeda, M., 2015. The hydrogen economy e Vision or reality? *International Journal of Hydrogen Energy*, [e-journal] 40, p. 7903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.032>.

70. Tashie-Lewis, B., C., 2021. Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, [e-journal] 8, p. 100172. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100172>.

71. Hydrogen is like fuel. - [Electronic resource]. - Access mode: <https://biz.liga.net/ekonomika/tek/opinion/vodorod-kak-toplivo-mirovoy-trend-opyt-kakih-stran-i-dlya-chego-mojet-perenyat-ukraina> (Date of circulation 12.10.2023).

72. Tetior A.N. Urban ecology. - [Electronic resource]. - Access mode: <https://libr.me/ekologii-osnovi/gorodskaya-ekologiya-ucheb-posobie-dlya-stud.html> (Date of access 10.11.2023).



УДК 621.18

STUDY OF THE POSSIBILITY OF CONVERTING A STEAM BOILER INTO WATER HEATING MODE WITHOUT REDUCING ITS OPERATIONAL RELIABILITY

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕВЕДЕННЯ ПАРОВОГО КОТЛА В РЕЖИМ ВОДОГРІЙНОГО БЕЗ ЗНИЖЕННЯ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ

Hlushchenko O.L. / Глущенко О.Л.

s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-9230-9958

Kaistrya R.A. / Кайстрия Р.А.

master's degree / магістр

Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Dneprostroyevskaia 2, 51918

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Дніпробудівська 2, 51918

Анотація. В умовах ринкової економіки важливого значення набуває завдання зниження собівартості виробництва й споживання теплоенергії. Зниження витрати палива в теплотехнології – це не тільки важливий економічний захід для паливно-енергетичного комплексу країни, але й шлях значного зниження капіталоемкості теплотехнологічного і, особливо, теплотехнічного обладнання, капітальні витрати на які з розвитком енергетичного й технологічного процесу систематично збільшуються. В роботі розглядається доцільність та можливість переведення парового котельного агрегату типу Е на водогрійний режим роботи. Із цією метою виконуються тепловий і гідравлічний розрахунки котла й пропонується реконструкція системи циркуляція води в котлі. Отримані результати розрахунку підтверджують, що при мінімальних капітальних витратах можливо забезпечити необхідний підігрів води, а це в свою чергу забезпечить заощадження паливних ресурсів.

Ключові слова: водогрійний котел, опалювальна котельня, циркуляційний контур, теплова мережа, топкова камера, тепловий та гідравлічний розрахунки, мережний насос.

Вступ.

В умовах ринкової економіки важливого значення набуває завдання зниження собівартості виробництва й споживання теплоенергії.

Існуюча на сьогодні індустріальна база України працює неефективно, в першу чергу тому, що діючі технологічні схеми і обладнання виробництв мають низькі енергозберігаючі й ресурсозберігаючі технології. Тобто, вартість затрат енергії, що приходить на питомий продукт, набагато вища, ніж у країнах Європи.

Підвищення ефективності виробництва неможливе без режиму економії. У зв'язку з розвитком промисловості на базі створення високопродуктивних установок зросло значення процесів тепло- і масообміну з точки зору раціонального використання теплоенергетичних і сировинних ресурсів. Найважливішим технічним завданням виробництва є інтенсифікація технологічних процесів та економія сировини, особливо палива.

Зниження витрати палива в теплотехнології – це шлях до зниження капіталоемкості теплотехнологічного і, особливо, теплотехнічного обладнання, капітальні витрати на які з розвитком енергетичного й технологічного процесу систематично збільшуються.



Постановка задачі.

Об'єктом розгляду є котел Е-1,0-0,9, встановлений у котельні виробничого підприємства. Завдяки даному котлу відбувається опалення допоміжних споруд. Пара, яка виробляється котлом, використовується для підігріву води, що споживається системою теплозабезпечення. Він призначений для роботи в закритій системі теплопостачання за графіком 75 - 90 °С.

З метою економії природного газу доцільно виконувати прямий нагрів води у водогрійному котлі. Із цією метою виконуються тепловий і гідравлічний розрахунки котла й пропонується реконструкція системи циркуляція води в котлі. Це дозволить при мінімальних капітальних витратах забезпечити необхідний підігрів води і заощадити паливо.

Результати роботи.

Об'єктом дослідження є котельний агрегат Е-1,0-0,9, який належить до типу вертикально - водотрубних, двохбарабанных із природною циркуляцією, призначений для виробітку насиченої пари тиском 0,9 МПа. Котел використовується для потреб опалення будинків технічних споруд. Технічна характеристика котельного агрегату представлена в [1].

Переобладнання котла зводиться, головним чином, до організації руху води з необхідними швидкостями, що забезпечують надійне охолодження труб поверхні нагрівання. Рух води в котлі здійснюється в такий спосіб: зворотна вода двома паралельними потоками подається в нижні колектори бічних екранів через чотири штуцери (по два на кожному колекторі, діаметром 51 × 3 мм) по трубах бічних екранів піднімається у верхні колектори. З верхніх колекторів бічних екранів вода направляєється через стояки в поперечний колектор. По поперечному колекторі й трубам стельового екрану вода попадає у верхній барабан котла, у якому встановлена перегородка для напрямку потоку в труби першого ряду конвективного пучка. По трубах першого ряду конвективного пучка вода опускається в нижній барабан і по інших трубах надходить у верхній барабан котла, звідки направляєється споживачеві.

Схема циркуляції води в котлі представлена на рисунку 1. Вихідні дані для розрахунку котельного агрегату представлені в таблиці 1.

Розрізняють конструктивний і перевірочний тепловий розрахунок. Для існуючого котлоагрегату виконують перевірочний розрахунок по наявних конструктивних характеристиках при заданих навантаженнях й паливі. При перевірочному розрахунку невідомі проміжні температури димових газів і внутрішнього середовища, кінцеві температури відхідних газів, підігріву повітря й іноді перегріву пари. Для виконання розрахунку доводиться задаватися цими температурами й уточнювати їх шляхом послідовних наближень. При розрахунку на початку визначають обсяги й ентальпії повітря й продуктів згоряння, ККД і витрату палива, а потім виконують розрахунок теплообміну в топковій камері й інших поверхонь нагрівання.

Розрахунок виконаємо на підставі нормативного методу теплового розрахунку котельних агрегатів [2]. Результати теплового розрахунку представлені в таблиці 2.

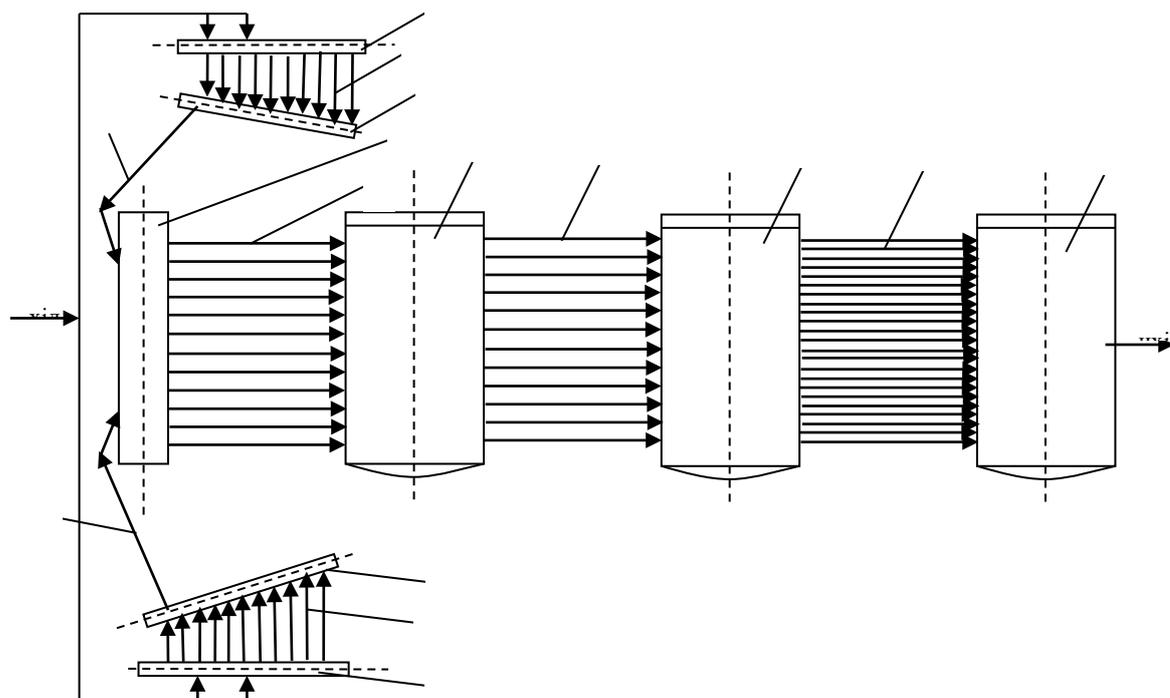


Рисунок 1 — Схема циркуляції води у котлі Е-1,0-0,9

1 — нижні колектори бокових екранів; 2 — труби бокових екранів; 3 — верхні колектори бокових екранів; 4 — стояки; 5 — поперечний колектор; 6 — труби стельового екрану; 7 — верхній барабан; 8 — труби I ряду конвективного пучка; 9 — нижній барабан; 10 — труби II – XI рядів конвективного пучка

Таблиця 1 – Вихідні дані для теплового розрахунку котельного агрегату Е-1,0-0,9

Найменування показника	Одиниці виміру	Значення величини
1	2	3
1. Паропродуктивність D	т/год.	1,0
2. Тиск пари в барабані P_6	МПа	0,48
3. Температура живильної води	°С	9
4. Паливо		Природний газ
5. Склад газу:	%	
- CH_4		98,9
- C_2H_6		0,3
- C_3H_8		0,1
- C_4H_{10}		0,1
- N_2		0,4
- CO_2		0,2
6. Теплота згорання палива, Q_H^p	кДж/м ³	35880



Таблиця 2 – Результати теплового розрахунку котельного агрегату Е-1,0-0,9 у водогрійному режимі роботи

№ з/п	Назва величини	Позначення	Одиниці виміру	Розрахункове значення
1	2	3	4	5
Розрахунок теплового балансу котла				
1	Температура відхідних газів	$v_{\text{відх}}$	$^{\circ}\text{C}$	360
2	Ентальпія відхідних газів	$I_{\text{відх}}$	кДж/м^3	6378,3
3	Температура холодного повітря	$t_{\text{хп}}$	$^{\circ}\text{C}$	16
4	Ентальпія холодного повітря	$I_{\text{хп}}$	кДж/м^3	199,9
5	ККД котла	$\eta_{\text{к}}$	%	78,8
6	Температура води на вході	t'	$^{\circ}\text{C}$	70
7	Ентальпія води на вході	i'	кДж/кг	293,5
8	Температура води на виході	t''	$^{\circ}\text{C}$	95
9	Ентальпія води на виході	i''	кДж/кг	398,6
10	Витрата палива	B	$\text{м}^3/\text{с}$	0,027
Розрахунок теплообміну в топці				
11	Кількість теплоти, що вноситься до топки з повітрям	$Q_{\text{в}}$	кДж/м^3	299,89
12	Корисне тепловиділення у топці	$Q_{\text{т}}$	кДж/м^3	35930,5
13	Адіабатична температура горіння	v_a	$^{\circ}\text{C}$	1819
14	Температура газів на виході з топки	$v''_{\text{т}}$	$^{\circ}\text{C}$	1100
15	Ентальпія газів на виході з топки	$I''_{\text{т}}$	кДж/м^3	20503,8
16	Температура газів на виході з топки	$v''_{\text{т}}$	$^{\circ}\text{C}$	1090
17	Ентальпія газів на виході з топки	$I''_{\text{т}}$	кДж/м^3	20298,7
18	Сумарне теплосприймання топки	$\sum Q_{\text{л}}$	кДж/с	403,49
Розрахунок конвективної частини котла				
19	Температура газів на вході	v'_1	$^{\circ}\text{C}$	1090
20	Ентальпія газів на вході	I'	кДж/м^3	20298,7
21	Температура газів на виході	v''_1	$^{\circ}\text{C}$	725
22	Ентальпія газів на виході	I''	кДж/м^3	13421,1
23	Кількість теплоти, яка віддана газам	$Q_{\text{г1}}$	кДж/м^3	6584,5
24	Температура води на вході	t'	$^{\circ}\text{C}$	83
25	Температура води на виході	t''	$^{\circ}\text{C}$	95
26	Теплосприйняття поверхні по рівнянню теплопередачі	$Q_{\text{т1}}$	кДж/м^3	9720,17



При переведенні парового котла у прямотоковий водогрійний режим роботи для забезпечення циркуляції води у котлі необхідно підібрати циркуляційний насос. У зв'язку з цим в роботі виконано гідравлічний розрахунок котла за методикою, представленою в [2, 3].

Гідравлічний розрахунок, результати якого наведені у таблиці 3, виконується по окремим ділянкам тракту відповідно до схеми циркуляції води (рисунок 1):

- 1 ділянка — розподільна гребінка, що з'єднує основний трубопровід мережевого насосу з нижнім колектором за допомогою двох патрубків;
- 2 ділянка — від нижнього колектора до верхнього;
- 3 ділянка — від верхнього колектора до поперечного колектора;
- 4 ділянка — від поперечного колектора до входу у верхній барабан;
- 5 ділянка — від верхнього барабану до входу у нижній барабан;
- 6 ділянка — від нижнього барабану до входу у верхній барабан;
- 7 ділянка — трубопровід, що з'єднує верхній барабан з початковою точкою тепломережі.

Підсумковий гідравлічний опір $\sum \Delta P$, Па котла визначаємо за формулою:

$$\sum \Delta P = \sum \Delta P_1 + \sum \Delta P_2 + \sum \Delta P'_1 + \sum \Delta P'_2 + \sum \Delta P_3 + \sum \Delta P'_3 + \sum \Delta P_4 + \sum \Delta P_5 + \sum \Delta P_6 + \sum \Delta P_7, \quad (1)$$

$$\sum \Delta P = 2 \cdot 10137,11 + 2 \cdot 42,3 + 2 \cdot 6279,74 + 577,49 + 330,1 + 2,05 + 4116,79 = 37944,73 \text{ Па} \approx 38 \text{ кПа.}$$

Вибір мережного насосу здійснюється на підставі розрахункових сумарного перепаду тиску в тепловій мережі та сумарного гідравлічного опору котла, які відповідно складають 136,6 кПа та 38 кПа.

Таким чином, сумарна втрата тиску в цілому на мережі, враховуючи сумарний гідравлічний опір котла складає 175 кПа.

Втрата води в тепломережі складає 26 м³/год. Цим характеристикам відповідає односхідцевий відцентровий насос Wilo IPN 65/160-5,5/2 (65 мм — діаметр патрубка, що приєднується; 55 Вт — потужність електродвигуна; 160 мм — діаметр робочого колеса; 2 — тип захисту електродвигуна) із щільним ущільнювачем, що ковзає. Температура середовища — від -10 °С до + 140 °С; робочий тиск: 13 · 10⁵ Па - до 140 °С; 16 · 10⁵ Па - до 120 °С. ККД двигуна 85 %.

Таблиця 3 – Результати гідравлічного розрахунку котельного агрегату Е-1,0-0,9 у водогрійному режимі

№ з/п	Назва величини	Позначення	Одиниці виміру	Розрахункове значення
1	2	3	4	5
Ділянка 1				
1	Витрата води	G	кг/с	3.595
2	Швидкість води	ω	м/с	2,33
3	Втрати на тертя	ΔP_{TR}	Па	131,65
4	Втрати на місцевих опорах	ΔP_{m1}	Па	10005,16
5	Сума втрат	$\sum \Delta P_1$	Па	10137,11



Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
Ділянка 2				
6	Витрата води	G	кг/с	0,2115
7	Швидкість води	ω	м/с	0,14
8	Втрати на тертя	ΔP_{TP}	Па	6,18
9	Втрати на місцевих опорах	ΔP_m	Па	36,12
10	Сума втрат	$\sum \Delta P_2$	Па	42,3
Ділянка 3				
11	Витрата води	G	кг/с	3,6
12	Швидкість води	ω	м/с	2,33
13	Втрати на тертя	ΔP_{TP}	Па	882,06
14	Втрати на місцевих опорах	ΔP_m	Па	5397,68
15	Сума втрат	$\sum \Delta P_3$	Па	6279,74
Ділянка 4				
16	Витрата води	G	кг/с	0,6536
17	Швидкість води	ω	м/с	0,42
18	Втрати на тертя	ΔP_{TP}	Па	81,28
19	Втрати на місцевих опорах	ΔP_m	Па	496,21
20	Сума втрат	$\sum \Delta P_3$	Па	577,49
Ділянка 5				
21	Витрата води	G	кг/с	0,5136
22	Швидкість води	ω	м/с	0,33
23	Втрати на тертя	ΔP_{TP}	Па	36,97
24	Втрати на місцевих опорах	ΔP_m	Па	293,13
25	Сума втрат	$\sum \Delta P_3$	Па	330,1
Ділянка 6				
26	Витрата води	G	кг/с	0,0521
27	Швидкість води	ω	м/с	0,03
28	Втрати на тертя	ΔP_{TP}	Па	0,26
29	Втрати на місцевих опорах	ΔP_m	Па	1,79
30	Сума втрат	$\sum \Delta P_3$	Па	2,05
Ділянка 7				
31	Витрата води	G	кг/с	7,19
32	Швидкість води	ω	м/с	1,48
33	Втрати на тертя	ΔP_{TP}	Па	186,12
34	Втрати на місцевих опорах	ΔP_m	Па	3930,67
35	Сума втрат	$\sum \Delta P_3$	Па	6,79

Висновки.

В даній роботі проведено переобладнання котельного агрегату, а саме, переведення його з парового режиму роботи у водогрійний. З цією метою



виконаний тепловий розрахунок котла у водогрійному режимі роботи; зроблено гідравлічний розрахунок котла при прямоточному русі води, отримані дані по гідравлічному опорі котла, які використовуються при виборі мережного насосу. Отримані результати показують ефективний рівень роботи котельного агрегату при переобладнанні його з парового режиму роботи у водогрійний і дає можливість при мінімальних капітальних витратах забезпечити необхідний підігрів води і заощадити паливо.

Література:

1. Інструкція з реконструкції котла Е-1,0-0,9 для використання як водогрійний котел. - Кам'янське, 2017. - 95 с.
2. Квятковська Ю.П., Літовко Б.М., Марчик М.О. Котельні установки промислових підприємств: Навчальний посібник. – Кривий Ріг, 2016. – 231 с.
3. Степанов Д.В. Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник / Д.В. Степанов, Є.С. Корженок, Л.А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 120 с.

***Abstract.** In the conditions of a market economy, the task of reducing the cost of production and consumption of thermal energy becomes important. Reducing fuel consumption in heat technology is not only an important economic measure for the fuel and energy complex of the country, but also a way to significantly reduce the capital intensity of heat technology and, especially, heat technology equipment, the capital costs of which systematically increase with the development of the energy and technological process. The paper examines the expediency and possibility of switching the E-type steam boiler unit to water-heating mode of operation. For this purpose, thermal and hydraulic calculations of the boiler are performed and reconstruction of the water circulation system in the boiler is proposed. The obtained calculation results confirm that with minimal capital costs, it is possible to provide the necessary water heating, and this, in turn, will ensure the saving of fuel resources.*

***Key words:** water heating boiler, heating boiler room, circulation circuit, heating network, combustion chamber, thermal and hydraulic calculations, network pump.*

Стаття відправлена: 15.12.2023р.

© Глущенко О.Л.



УДК : 664.665:664.654.1(045)

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING GLUTEN-FREE BREAD USING SPONTANEOUSLY FERMENTED YOURDERS**ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО ХЛІБА З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАКВАСОК СПОНТАННОГО БРОДІННЯ****Verbets T.M. / Бербец Т.М.***s.p.s., as. prof. / к.п.н, доц.*

ORCID: 0000-0002-9334-7112

Dzhoha O.V. / Джога О.В.*PhD, as. prof / докт. філ., доц.*

ORCID: 0000-0003-2574-4906

*Pavlo Tychna Uman State Pedagogical University, Sadova, 2, Uman, 20300,
Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини,
Умань, Садова, 2, 20300*

Abstract: *An increasing number of people recently refuse to consume products containing gluten, citing its harmful effects on the body . According to WHO data, about 1% of the world's population suffers from celiac disease, a hereditary gluten intolerance. Celiac disease requires strict adherence to a special gluten-free diet. The article describes the expediency of using leaven of a spontaneous fermenter from the flour of cereal crops (corn, buckwheat and rice) in the technology of gluten-free bread. It was established that leavens have a positive effect on the physico-chemical and organoleptic indicators of finished products with a control sample.*

Keywords: *gluten-free bread, technology, leavens, fermentation*

Formulation of the problem.

Gluten is a group of proteins that is part of cereal seeds: wheat, rye, oats. An increasing number of people recently refuse to consume products containing gluten, citing its harmful effects on the body .

Products such as rye, wheat, and barley are 80% gluten protein. This protein, or more precisely, its particles, moving through the small intestine, can damage the villi on the surface of its mucous membrane. Villi help move food through the intestines and promote its assimilation. Excluding products containing gluten from the diet, you can strengthen the villi and, as a result, normalize the work of the digestive tract.

In the food industry and everyday life, gluten is also known as gluten. The concentration of gluten in flour is one of the indicators of quality: the greater the amount of gluten, the more aromatic and lush the baked bread will be. Gluten proteins make up 80% of the total amount of proteins present in bread. These proteins are rich in essential amino acids that enter the body with food.

According to WHO data, about 1% of the world's population suffers from celiac disease, a hereditary gluten intolerance. Celiac disease requires strict adherence to a special gluten-free diet. However, experts at the University of Maryland Center for the Study of Celiac Disease say that many more people suffer from mild gluten intolerance.

Scientists and manufacturers of many countries of the world are paying attention to the issue of developing the technology of gluten-free bakery products. The problem of creating gluten-free bakery products is also relevant in Ukraine, but the population's needs for them are met mainly by expensive imported products.



Analysis of recent research and publications.

Gluten-free food products are intended for people with celiac disease, which is caused by an allergic reaction of the body to α -gliadin, which is manifested in the irritation of the mucous membrane of the small intestine [1,2].

As a result of such processes, the assimilation of food nutrients by the patient's body deteriorates, which causes a decrease in body weight, vitamin deficiency, nervous disorders and others. Patients with celiac disease follow a gluten-free diet and completely exclude from the diet products that contain wheat, rye, barley and oats. At the same time, there is a problem in following a diet, since many products on the market contain "hidden gluten". It is known that in the technology of cheeses and meat products, dry wheat gluten is used, and cereal products are added to milk drinks. Eating bread, pasta, confectionery and products that contain gluten leads to an exacerbation of the disease, so the diet of such people is very limited. To ensure the diversity of the diet, special dietary products are made: gluten-free bread, gluten-free pasta, cereals based on various types of starches and gluten-free types of flour. To prevent this, traditional bread products are replaced with protein-free or gluten-free ones. To ensure the diversity of the diet of patients with celiac disease, special protein-free or gluten-free dietary products are made - bread, confectionery and pasta products, the recipe of which includes various types of starch and gluten-free types of flour. The gluten-free diet has become a fashionable trend over the last decade, and its supporters believe that it contributes to the health and rejuvenation of the body [3].

For the production of gluten-free bread, it is allowed to use rice, corn, buckwheat, millet, sorghum and amaranth flour. The production technology of this bread, in contrast to the traditional one made from wheat and rye flour, involves only the proofing of the dough blanks and the absence of the dough fermentation process, so the products are characterized by a fresh taste and a faint aroma [4].

One of the ways to improve the quality of gluten-free bread is the use of sourdough starters.

The easiest way to determine hypersensitivity to gluten is to exclude certain products from the diet. The main source of gluten is flour, so the first step is to eliminate any flour products. However, giving up only bread and muffins will not allow you to accurately identify problems with gluten absorption. The reason for this is that, in addition to gluten, flour products contain a large amount of carbohydrates (sugar, starch). Therefore, it is impossible to say with certainty which of the components has a harmful effect on the body. Also, a large number of vegetables and the absence of starch in the diet make a gluten-free diet very similar to a carbohydrate-free diet. For some reason, the fact that the refusal of flour products led to the loss of extra kilograms and the acquisition of vigor does not give certainty that gluten itself is harmful to the body [5].

Spanish and Argentinian scientists have proven the relevance of developing gluten-free products, in particular, using the process of spontaneous fermentation [6].

In Turkey, the influence of spontaneous fermentation rice starter on the rheological properties of the dough and the technological process of baking bread from rice flour was investigated [7].

Irish scientists from the School of Food Sciences studied starters of spontaneous



fermentation from buckwheat flour under different fermentation conditions and found in them a wide range of developed microflora: various types of lactic acid bacteria and yeasts, which were traditional for wheat and rye starters, and some species, in particular *Pediococcus pentosaceus*, *Leuconostoc holzapfelii*, *Lactobacillus gallinarum*, *Lactobacillus vaginalis*, *Lactobacillus sakei*, *Lactobacillus graminis* and *Weissella cibaria*, *Lactobacillus plantarum*, were unconventional. They proved that the composition of stable microflora as a whole depends on the fermentation conditions [8].

Nigerian scientists developed a spontaneous fermentation starter from corn flour and studied the microflora at different pH values [9].

At the University of Hohenheim in Germany, universal and microbiologically resistant strains of lactic acid bacteria were isolated using spontaneous fermentation of amaranth flour dough [10].

The purpose of the work is the study of the feasibility of using starters of spontaneous fermentation from the flour of cereal crops for the production of gluten-free bread.

Materials and methods.

Trial laboratory baking of bread with the addition of corn, buckwheat and rice sourdough was carried out. 10% of the flour specified in the recipe was added with the leaven. Control sample of bread - without using leaven.

Organoleptic indicators of the quality of finished products are established according to DSTU 7044:2009, physico-chemical indicators - according to DSTU 7045:2009 in 4 hours after baking.

Results.

The first stage was the preparation of the starter for spontaneous fermentation, consisting of cycles of dilution and renewal.

In the dilution cycle, sourdough is prepared from flour of a certain type of cereal crop and water with a temperature of 30–32 °C. The cycle lasted 72 hours. After every 24 h, a nutritional mixture of flour and water was added to the previously ripe sourdough. The moisture content of the sourdough was 56–60%, depending on the water absorption capacity of the flour, and it had a final acidity of 10.5–18.5 degrees. Since the water-absorbing capacity of each type of flour is different, water was added until the mixture reached a "sour cream-like" consistency (the ratio of flour to water was from 1:2 to 1:2.5). The production cycle involved the selection of 30% of the starter and the addition of a nutrient mixture.

Renewal of sourdough was carried out in order to accumulate its quantity and wash out of it "wild microflora", which gives sourdough a bitter taste and a specific sour smell.

After the fifth renewal, the quality of the sourdough stabilizes, it has good organoleptic properties, accumulates the necessary acidity and acquires sufficient activity of lactic acid bacteria and can be used in the production cycle for making bread. This can be explained by the change in the composition of the sourdough microflora during its fermentation.

In spontaneous sourdough, fermentation is carried out by microflora introduced with flour, which is quite diverse. However, the main microflora is the lactic acid



bacteria *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus brevis*, as well as the acid-resistant yeast *Saccharomyces minor*.

Corn sourdough is characterized by the lowest activity, which correlates with the lowest accumulated acidity. During the study of the composition of the microbiota of cereal starter cultures, it was found that they are represented by a wide range of microorganisms of different taxonomic groups, among which lactic acid bacteria of the genera *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Enterococcus* and *Leuconostoc* dominate.

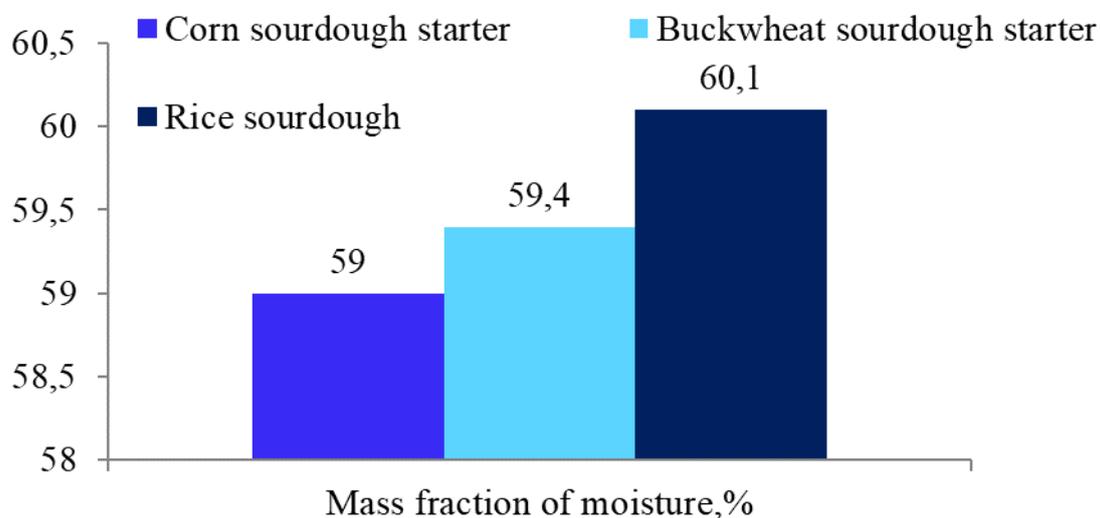


Fig. 1. The mass proportion of moisture in starter cultures

Author's development

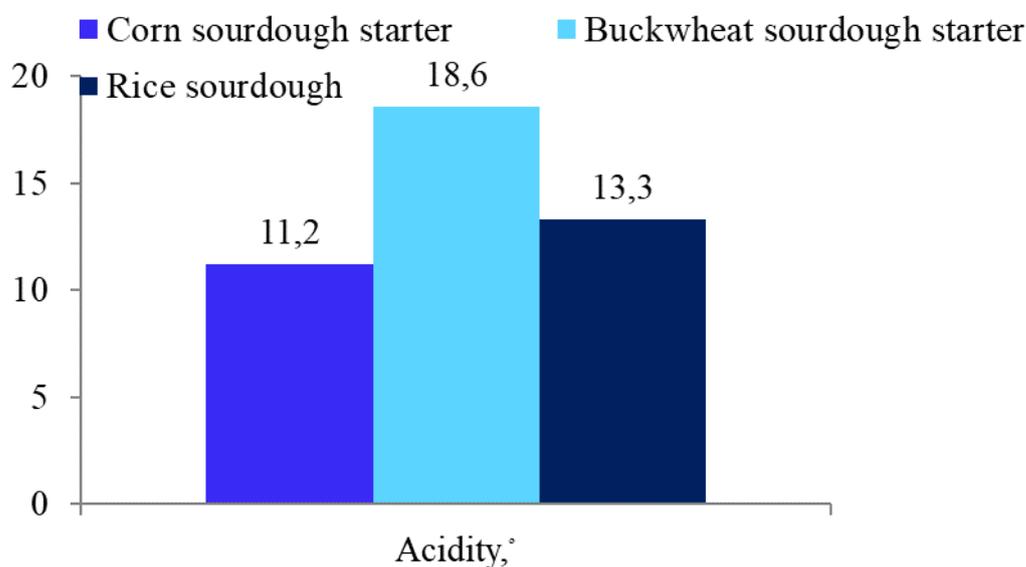


Fig. 2. The Acidity in starter cultures

Author's development

Research into the technological properties of cereal flour and the results of trial laboratory baking showed that gluten-free bread with cereal flour differs in terms of quality from bread made from starch. Rice, corn and buckwheat flour affects the rheological parameters of the dough quality, which leads to a decrease in the specific volume of bread.

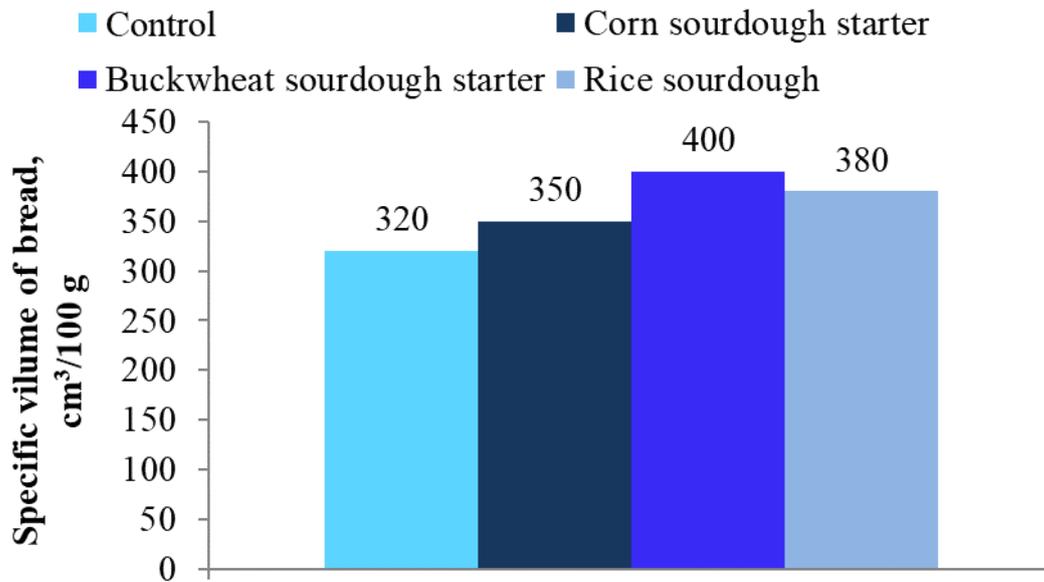


Fig. 3. Specific volume of bread produced in laboratory conditions, cm³/100 g
 Author's development

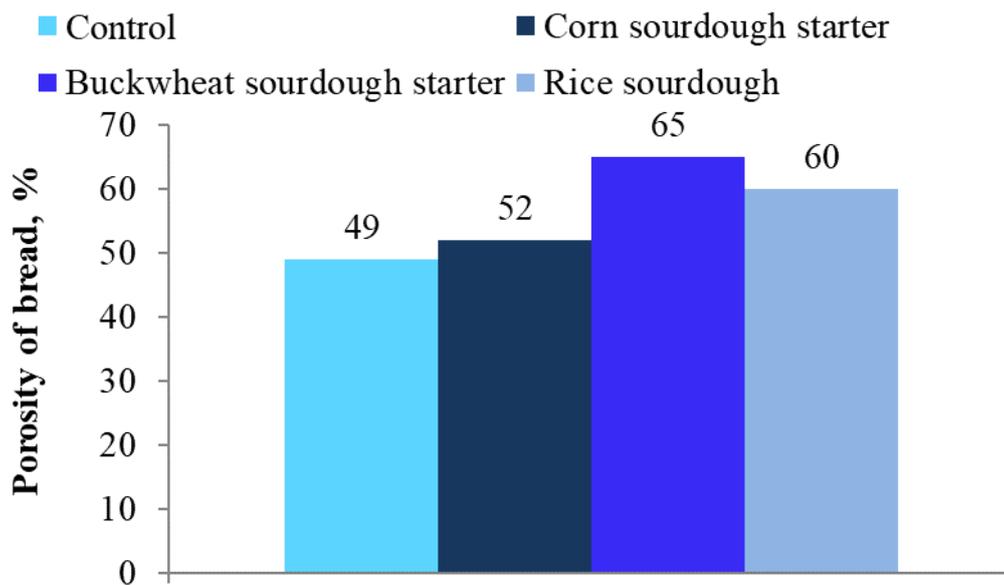


Fig. 4. Porosity of bread made in laboratory conditions, %
 Author's development

In order to improve the existing technology for making gluten-free bread and to improve the organoleptic and physico-chemical quality indicators, trial baking of bread was conducted in laboratory conditions using leavens of spontaneous fermentation.

It has been investigated that the addition of leavening agents from cereal flour increases the accumulation of acids in the dough, and the duration of the proofing of the dough blanks is reduced by 10–15 min compared to the control

Sourdough bread has an elastic crumb with uniform porosity, a pronounced taste and aroma, a larger volume, a better porosity index than the control sample.

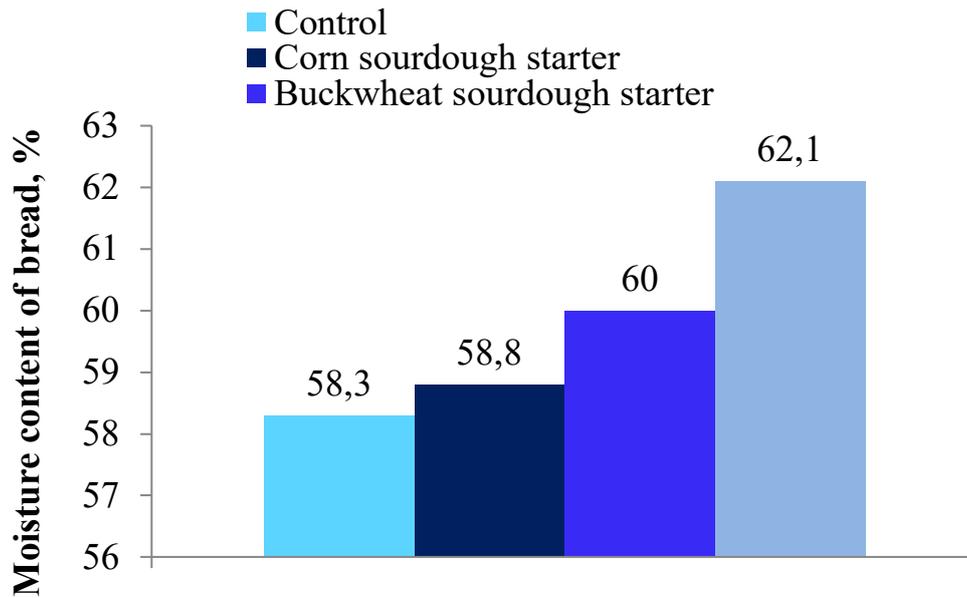


Fig. 5. Moisture content of bread made in laboratory conditions, % *Author's development*

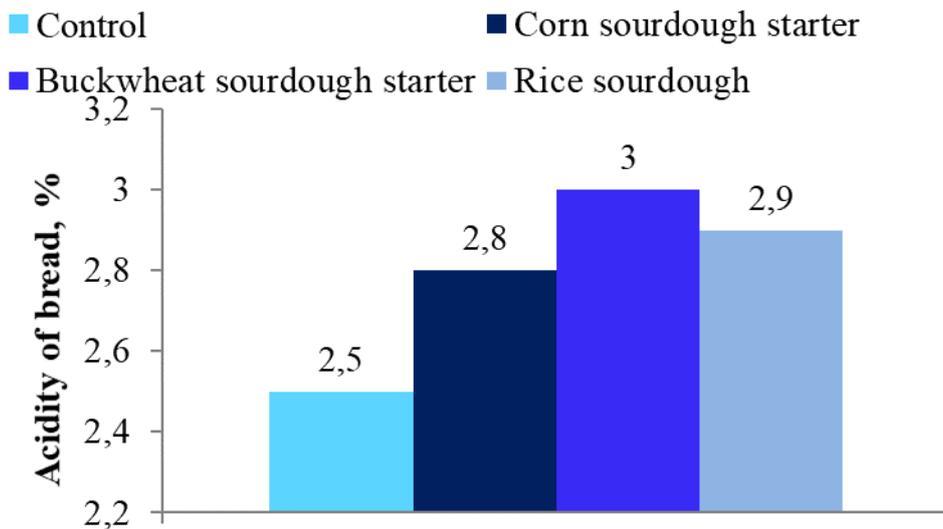


Fig. 6. Acidity of bread made in laboratory conditions *Author's development*

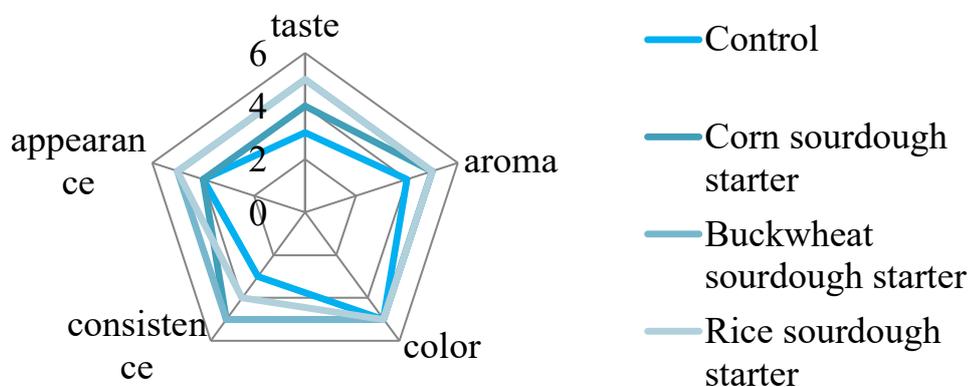


Fig. 7. Organoleptic evaluation of gluten-free bread produced in laboratory conditions *Author's development*



According to the results of the tasting commission, it was established that the organoleptic indicators of bread with the addition of sourdough have higher ratings. The unleavened bread had a fresh taste and a pale crust.

Conclusions. The effectiveness of the use of leavens of spontaneous fermentation from corn, buckwheat and rice flour in the technology of gluten-free bread has been proven. These starters intensify the accumulation of acids in the dough and speed up the ripening process.

As a result of the vital activity of lactic acid bacteria, ready-made bread has a pronounced taste and aroma, and their positive effect on the volume of bread and its porosity is observed.

References

1. Šmídová Z., Rysová J. Gluten-free bread and bakery products technology. *Foods*. 2022. № 11(3). P. 480-495.
2. Bender D., Schönlechner R. Innovative approaches towards improved gluten-free bread properties. *Journal of Cereal Science*. 2020. № 91. P. 102-109.
3. Muzaffar K., Sofi S. A., Mir M. B., Bhat, N. A. Technological Aspects of Gluten Free Bread. *Gluten-free Bread Technology*. 2021. P. 29-48.
4. Mir S. A., Shah M. A., Naik H. R. Influence of hydrocolloids on dough handling and technological properties of gluten-free breads. *Trends in Food Science & Technology*. 2016. № 51. P. 49-57.
5. Dubrovskaya N., Savkina O., Kuznetsova L., Parakhina, O. The development of gluten-free sourdough bread technology with rowan powder. 2018. P. 1-12.
6. Naqash F., Gani A., Gani A., Masoodi F. A. Gluten-free baking: Combating the challenges-A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2017. № 66. P. 98-107.
7. Conte P., Fadda C., Drabinska N., Krupa-Kozak U. Technological and nutritional challenges, and novelty in gluten-free breadmaking: A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2019. № 69(1). P. 1-15.
8. Padalino L., Conte A., Del Nobile M. A. Overview on the general approaches to improve gluten-free pasta and bread. *Foods*. 2016. № 5(4). P. 87-98.
9. Arendt E. K., Morrissey A., Moore M. M., Dal Bello F. Gluten-free breads. In *Gluten-free cereal products and beverages*. 2008. P. 289-307.
10. El Khoury D., Balfour-Ducharme S., Joye I. J. A review on the gluten-free diet: Technological and nutritional challenges. *Nutrients*. 2018. № 10. P. 14-22.
11. Wang K., Lu F., Li Z., Zhao L. Recent developments in gluten-free bread baking approaches: a review. *Food Science and Technology*. 2017. № 37. P. 1-9.

Анотація: Останнім часом все більше людей відмовляються від вживання продуктів, що містять глютен, посилаючись на його шкідливий вплив на організм. За даними ВООЗ, близько 1% населення планети страждає на целиакію – спадкову непереносимість глютену. Целиакія вимагає суворого дотримання спеціальної безглютенової дієти. У статті описано доцільність використання заквасок спонтанного бродіння з борошна круп'яних культур (кукурудзяного, гречаного та рисового) у технології безглютенового хліба. Встановлено, що закваски позитивно впливають на фізико-хімічні та органолептичні показники готових виробів порівняно з контрольним зразком.



Ключові слова: безглютеновий хліб, технологія, закваски, бродіння

Стаття відправлена: 13.11.2023р.
© Бербец Т.М., © Джога О.В.



УДК 636.2.084/087.074

EXCHANGE OF PROTEINS AND NUCLEIC ACIDS IN THE TISSUES OF CHICKENS IN CONNECTION WITH AGE AND PHYSIOLOGICAL STATE OF THE BODY**ОБМІН БІЛКІВ ТА НУКЛЕЇНОВИХ КИСЛОТ В ТКАНИНАХ КУРЕЙ У ЗВ'ЯЗКУ З ВІКОМ ТА ФІЗІОЛОГІЧНИМ СТАНОМ ОРГАНІЗМУ****Рылірко Т.М. / Приліпко Т.М.,***d.a.s., prof. / д.с.н., проф.*

ORCID: 0000-0002-8178-207X

Publons: AAF-5445-2019

Koval T.V., / Коваль Т.В.*s.a.s., as.prof. / к.с.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-7132-5887

*Higher education institution « Podolsk State University»,**Kamianets-Podilskyi, Shevchenko, 13, 32300**Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»*

Abstract. *The results of the study of the exchange of proteins and nucleic acids in the tissues of chickens in connection with the age and physiological state of the body are given. It was established that the live weight of experimental chickens met their standards, which are accepted for the corresponding age periods. The fastest growth and development was observed in the first three months of life, then body weight increased more slowly, and at the age of 6.5-12 months it was maximum - 2000-2200 g for Leghorn chickens, 2200-2400 g - for New Hampshire chickens. The absolute weight of the liver of Leghorn chickens gradually increased until almost 12 months of age (spring egg-laying), and during molting and sexual rest (18 months) it significantly decreased (by 24%) and corresponded to the weight of the organ during puberty (4.5 months). With the beginning of a new egg-laying cycle (20 months), the weight of the liver increased again, but did not reach the level of spring egg-laying (12 months). The relative weight of the liver gradually decreases with age, except for the weight during winter egg laying (6.5 months) and during spring egg laying (12 months). During these periods, the relative weight of the liver does not change. The absolute mass of both sections of the oviduct increases many times before the beginning of egg laying and reaches its maximum values during spring egg laying, exceeding by 4-8 times their mass during puberty (4.5 months), and with the cessation of egg laying it sharply decreases and reaches the level during puberty. With the beginning of a new egg-laying cycle, both sections of the oviduct increase again by 2-4 times, but do not reach their mass at the age of 12 months. In the liver, the content of non-protein nitrogen also actively increases with age, and its maximum values are noted at 6.5 and 12 months, that is, at the beginning and during the most intensive spring egg-laying, and during the period of sexual rest, its amount decreases by 20-25%; with the beginning of the second ovulation cycle, a new rise is noted, but to a lesser extent than in previous periods of sexual activity.*

Key words: *liver, chickens, egg laying, breed, protein, nitrogen, metabolism*

In order to build a full-fledged theory of the ontogenesis of agricultural animals and poultry, it is necessary to have a broad foundation of facts on the chemistry of protoplasm and changes in its individual components during embryogenesis and in the postnatal period of life up to aging and lethality, which is of great general biological and practical importance in animal husbandry. In particular, the study of metabolism in tissues is important for the correct organization of feeding and maintenance of animals in order to increase their productivity.

Nucleic acids take part in the synthesis of specific proteins, in the growth and reproduction of cells, in the transmission of hereditary properties [5, 6]. Changes in



the number of nucleic acids in tissues can serve as indicators of the intensity of protein synthesis in them, depending on the age and functional state of the body.

It is known that with age, the synthesis and rate of self-renewal of proteins gradually decrease and at the same time the concentration of nucleic acids decreases, which is equally characteristic of animals, microorganisms and plants, that is, a phenomenon characteristic of all living nature [1].

With age, not only the amount of ribonucleic acids (RNA) and deoxyribonucleic acids (DNA) in the protoplasm decreases, but also the ratio between nucleic acids, proteins and lipids changes [7], reflecting the level of synthetic processes in the cell.

Given that the body of chickens synthesizes a large amount of protein, we studied the peculiarities of their metabolism in different periods of their growth and development at different physiological states of the body.

Research was conducted on egg-laying Leghorn chickens and New Hampshire egg-meat breed in the following age periods: 2-3 days after hatching; 1, 2, 3 months – growth and development; 4.5 months – puberty; 6.5 months - the beginning of egg laying; 12 months - spring egg-laying; 18 months – sexual calmness, molting; 20 months - the beginning of a new egg-laying cycle. Feeding and maintenance of chickens were complete, in accordance with age, season of the year and productivity.

Research objects: the liver is a heterogeneous organ that performs numerous synthetic functions in the body; pectoral muscles – organs with pronounced mechanical and energetic functions, which represent the most valuable part of the carcass; oviduct, the function of which is extremely complex. In the oviduct, all substances necessary for the completion of egg formation are added to the yolk. Protein and non-protein nitrogen, collagen, nucleic acids and phosphoproteins were determined in the tissues. In each series of experiments, there were 6-8 chickens, which were slaughtered after a 12-hour diet. The removed tissues were immediately placed on ice and examined. Average data were obtained based on the results of 6-8 studies and statistically processed.

The live weight of experimental chickens met their standards, which are accepted for the corresponding age periods. The fastest growth and development was observed in the first three months of life, then body weight increased more slowly, and at the age of 6.5-12 months it was maximum - 2000-2200 g for Leghorn chickens, 2200-2400 g - for New Hampshire chickens.

We will present the data obtained on the Leghorn breed. The absolute weight of the liver gradually increased until almost 12 months of age (spring egg-laying), and during molting and sexual rest (18 months) it significantly decreased (by 24%) and corresponded to the weight of the organ during puberty (4.5 months). With the beginning of a new egg-laying cycle (20 months), the weight of the liver increased again, but did not reach the level of spring egg-laying (12 months).

The relative weight of the liver gradually decreases with age, except for the weight during winter egg laying (6.5 months) and during spring egg laying (12 months). During these periods, the relative weight of the liver does not change. The high weight of the liver at 6.5, 12 and 20 months can be explained by its increased functional activity in connection with egg laying. Obviously, during the egg-laying period, various egg precursors are synthesized in the liver.



The absolute mass of both sections of the oviduct increases many times before the beginning of egg laying and reaches its maximum values during spring egg laying, exceeding by 4-8 times their mass during puberty (4.5 months), and with the cessation of egg laying it sharply decreases and reaches the level during puberty. With the beginning of a new egg-laying cycle, both sections of the oviduct increase again by 2-4 times, but do not reach their mass at the age of 12 months.

The growth and development of the fallopian tubes are caused by hypertrophy and hyperplasia of all layers of the organ, especially the tubular and unicellular glands of the secretory layer. Different rates of growth and development of chickens in different periods of post-embryonic life and dynamism of physiological states of the body are related to the intensity and peculiarities of metabolism in different age periods of life. We studied these features using the example of changes in the nitrogenous and phosphorous compounds of the liver, pectoral muscles, the protein part of the fallopian tube, and the uterus.

During the growth and development of the body, protein nitrogen accumulates in the liver and muscles, and its maximum content is noted for the liver at the age of 6.5-12 months, for the muscles at the age of 12 months. At the age of 18 months (sexual quiescence), the amount of protein decreases (more in the liver and less in the muscles). With the beginning of a new egg-laying cycle, the level of protein nitrogen rises slightly, but not higher than during the spring egg-laying period (12 months). In the first days after birth, the liver contains 25-30% more protein than in the muscle, in the following periods its amount in both organs is approximately the same, with the exception of the age of 12, 18 and 20 months, when the protein in the muscles is somewhat more.

Works [3, 6] show that in the post-embryonic period of life, the protein content in tissues first increases, and then, after reaching a certain level, remains unchanged or gradually decreases. Our data correspond to the general biological orientation with the establishment of specific features for the liver and muscles of chickens. The picture of protein nitrogen changes in the oviduct of chickens looks different. In the process of growth and the onset of a new physiological state of the organism, the content of protein nitrogen in the tissues of the oviduct changes dramatically, especially in the protein part, where its amount increases by 50-70% compared to the period of puberty, and during sexual rest it decreases by almost the same amount. With the beginning of a new cycle of egg-laying (20 months), a new increase in the protein content is noted, but it does not reach the indicators at 12 months of age.

Similar changes with age and a change in the physiological state are observed in the uterus, but the total amount of protein is 24-45% less than in the protein department, which is due to their different function in egg formation.

Obviously, the reactions of protein deamination and hydrolysis take place more actively in the muscles than in the liver and oviduct. They contain more free nitrogen compounds, such as nucleotides, creatine and creatine phosphoric acid, creatinine, free amino acids, etc. In the pectoral muscles, non-protein nitrogen actively increases in the first month of life, more slowly in the next three months and maximally in 6.5 months, that is, in the period when growth and development are mostly finished and egg laying begins. In the following periods, the content of non-protein nitrogen in the



muscles gradually decreases or almost does not change due to the change in the physiological state of the body. Taking into account the intensive growth of protein and non-protein nitrogen until now, we can say that during the period of growth and development, protein synthesis prevails over other transformations, and in the future, a dynamic equilibrium is established in the reactions of synthesis and decay of nitrogenous substances.

In the liver, the content of non-protein nitrogen also actively increases with age, and its maximum values are noted at 6.5 and 12 months, that is, at the beginning and during the most intensive spring egg-laying, and during the period of sexual rest, its amount decreases by 20-25%; with the beginning of the second ovulation cycle, a new rise is noted, but to a lesser extent than in previous periods of sexual activity. This directionality of changes in non-protein nitrogen is also observed in both sections of the oviduct, in which it actively increases with the egg-laying period. At this time, non-protein nitrogen in the protein part of the oviduct is 20-25% more than during puberty.

Thus, the level of non-protein nitrogen in the liver and fallopian tube changes not only with age, but also depending on the functional activity of the organ, which changes depending on the physiological state of the body. This indicates that the most active transformation of proteins in the liver and fallopian tube occurs during egg laying, when the protein in the body is intensively synthesized, which is necessary for the formation of egg mass and other needs of the body. Precursors of egg proteins are obviously synthesized in the liver.

The high content of non-protein nitrogen in the tissues of the oviduct during egg-laying is apparently due not only to the products of protein metabolism of tissues, but also to low- and high-molecular nitrogen compounds brought by the blood, the amount of which increases during egg-laying by 50-100% [4].

The data on protein and non-protein nitrogen allow us to conclude that each type of tissue has its own characteristics of protein metabolism, which change differently due to age and the physiological state of the body. Collagen swells well with an excess of water and gives it away with increased removal of liquid from the body.

It was established that with age, the amount of collagen in the pectoral muscles decreases, and the most sharply in the first two months of life - by 25-30% compared to its content in day-old chickens, and by 18 months of age - by 50%. The amount of water changes in approximately the same way. Similar changes in collagen with age are noted [2] in the muscles of humans, pigs, and rats. Based on our data and those of other researchers, it can be assumed that as the animal body ages, the content of collagen in the tissues does not increase, but its physical and chemical structure changes, in particular, it becomes stronger against tearing, the time of fiber contraction increases, and its elasticity decreases. All these changes can be considered as a result of the increase in the strength of the bonds between all the components of the collagen complex, and not as a result of the accumulation of this protein.

In the uterus, the amount of collagen is 20% greater than in the protein department. This is consistent with the dynamics of water in them, the amount of which is greater in the uterus than in the protein part of the fallopian tube. In both



sections of the fallopian tube, the collagen content decreases with age, despite the change in its functional activity.

При утворенні шкаралупи в матці колаген складав 2,95%, а при формуванні білку в білковому відділі кількість колагену в матці була майже в два рази більше – 4,34%. Вміст колагену зростає і в білкоому відділі на 14,5%, коли яйце переходить у матку.

In all periods of research, the muscles contained 4-6 times less RNA phosphorus than in the liver and fallopian tube. In the liver and muscles, RNA phosphorus actively increases until one month of age, that is, during the period of the most active growth and development, when relatively large amounts of protein are needed as a plastic material for developing organs and tissues, as well as for resistance. In subsequent periods, the concentration of RNA in muscles steadily decreases with age and almost does not change due to different physiological states of the body.

In the liver, a decrease in the content of RNA is noted only before puberty and at 6.5 and 12 months, with the beginning and active spring egg-laying, there is a sharp rise in the content of RNA in the cytoplasm of the liver - by 25-30% more than at the age of 4.5 months. Then, with the completion of egg-laying, the amount of RNA decreases again, and with the beginning of a new cycle of egg-laying, its synthesis increases again. В м'язах вміст фосфору ДНК з віком поступово зменшується, крім тимчасової стабілізації в 4,5-6,5 і 12 місяців, тобто вміст ДНК в м'язах змінюється приблизно так само, як і РНК.

The ratio of RNA phosphorus / DNA phosphorus remains constant until 12 months of age, and then increases slightly as a result of a relative decrease in nuclear volume. In the liver, DNA phosphorus increases until the age of three months. At this time, obviously, cells divide most actively, which is determined by the level of DNA in them. During this period, the fastest increase in the absolute mass of the liver was noted. At 4.5 months, the amount of DNA decreases by 10-12% compared to its content at three months of age. With the beginning of egg-laying (6.5 months), the greatest increase in DNA phosphorus is noted, in 12 and 20 months its level does not actually change, and at 18 months, when egg-laying stops, the amount of DNA increases by 24% compared to the period of spring egg-laying (12 months) and a new egg-laying cycle (20 months). This should be explained by a decrease in the synthetic activity of liver cells and a relative increase in the volume of cell nuclei, which is confirmed by a decrease in the nuclear-cytoplasmic ratio of RNA phosphorus / DNA phosphorus, the amount of RNA phosphorus and the absolute weight of the liver.

Attention is drawn to the higher phosphorus saturation of RNA cytoplasmic formations of the protein department, in which it is 35-50% more than in the uterus, which is due to the different level of protein synthesis in their glandular cells. In the protein part of the oviduct, the entire mass of egg white proteins is secreted, and in the uterus, a little collagen is produced to form the framework of the shell and the epishell. The synthesis of ONK in the oviduct is more intense at 12 and 20 months, that is, during the period of spring egg-laying and its new cycle, and at 18 months (during sexual rest) the amount of RNA decreases, as it did before 6.5 months of age. If we take into account that before the beginning of egg-laying (6.5 months) and



especially before the period of spring egg-laying, both sections of the oviduct increase by 4-8 times, and the phosphorus content of RNA increases in 12 and 20 months per unit mass of tissue, then when calculating for the whole organ, a colossal synthesis of RNA is observed (Fig. 7), which undoubtedly takes part in the synthesis of egg proteins at the expense of amino acids brought by blood, and possibly also in the transformation of other blood proteins into egg protein.

With the cessation of egg laying, the RNA content in both departments decreases to the level at 4.5 months of age, and with the beginning of a new cycle of egg laying, the amount of RNA increases again, but does not reach the indicators of 12 months of age. Phosphorus in DNA practically changes little until spring egg-laying and during its repeated cycle, and increases by 43% during the period of sexual rest. This can also be explained by the relative increase in the volume of the nuclei of the glandular apparatus of the oviduct sections, which is indirectly confirmed by the decrease in the mass of both sections of the oviduct (involution) and a sharp decrease in the content of RNA up to this time, which saturates mainly the cytoplasm.

The stability of the DNA phosphorus content per unit mass of tissue during the egg-laying period is relative, since a large increase in DNA phosphorus is observed when calculating the entire organ. This indicates its active synthesis before the egg-laying period, as well as RNA. In our opinion, there is nothing unusual in this, since RNA and DNA are genetically related, DNA determines the synthesis of RNA.

In the liver, the content of phosphoproteins gradually decreases with age and, in fact, almost does not depend on the physiological state of the body. Another picture of the dynamics of phosphoproteins in the oviduct. During puberty, there is very little phosphorus in the tissues of the oviduct, and with the beginning of egg-laying (6.5 months) and especially during spring egg-laying (12 months), the number of phosphoproteins increases sharply; during sexual rest (18 months) in the uterus, they disappear completely, traces are found in the protein part. With the beginning of a new cycle of sexual activity (20 months), the amount of phosphorus in phosphoproteins increases again, but much less than during spring egg-laying (by 40-35%).

Conclusions.

The exchange of total proteins, collagen and nucleic acids has specific features for each type of tissue and depends on the age, physiological state of the body and breed of bird.

References

1. Exchange of proteins and nucleic acids in broiler chickens under the influence of microbiota A / O. V. Chechotkin, V. I. Voronyanskyi, O. M. Kucherenko // Abstracts of reports of the VI Ukrainian Biochemical Congress / Academy of Sciences of Ukraine, Ukrainian Biochemical Society, Institute of Biochemistry named after O. V. Paladina, Ukrainian Agricultural Academy. - Kyiv, 1992. - Part 2. - P. 103.
2. Exchange of substances in the liver and oviduct of chickens in different periods of egg formation and under the influence of regulatory factors / O. V.



Chechotkin, O. V. Kranina // Ukrainian conference of young scientists. - Kharkiv, 1992. - P. 28-29.

3. Exchange of proteins and nucleic acids in broiler turkeys in relation to age and breeding technology / O. V. Chechotkin, M. I. Kartashov, V. I. Voronyansky, O. M. Kucherenko // Problems of zootechnics and veterinary medicine and ways their solution in modern conditions: materials of reported scientific conferences Institute according to the results of research in 1992 and 1993 / Kharkiv Zooveterinary Institute. - Kharkiv, 1996. - Vol. 1(25). - P. 50-51.

4. Biochemistry of farm animals: textbook / under the editorship. O. V. Chechotkina; O. V. Chechotkin, V. I. Voronyanskyi, M. I. Kartashov. - Kharkiv: [RVV KhZVI], 2000. - 466 p.

5. Hladka N.I. Peculiarities of the energy metabolism of broiler chickens during technological cultivation and the use of humates and carotenoids: dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of agricultural sciences: 03.00.04 - biochemistry / Nataliya Ivanivna Hladka; National Agrarian University. - Kyiv, 2008.

6. V. O. Prykhodchenko Peculiarities of energy exchange processes in organism of broiler chickens under the influence of humates and carotenoids: dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Agricultural Sciences:03.00.13 - human and animal physiology / Vita Oleksandrivna Prykhodchenko; Institute of Animal Husbandry of the Ukrainian Academy of Sciences. - Kharkiv, 2009.

7. Nischemenko M.P., Omelchuk O.V., Khomyak O.A., Yemelyanenko A.A., Dovbysh V.V. The laying hens photolyticency me digestive organs activity under the selenium, zinc, and vitamin A nanoacvachelates influence. UniversumView17: International scientific and practical conference, Vinnytsia, December 10, 2019: abstracts of the report. Vinnytsia, 2019. P. 150–152.

Анотація. Наведені результати дослідження обміну білків та нуклеїнових кислот в тканинах курей у зв'язку з віком та фізіологічним станом організму. Встановлено, що жива маса дослідних курей відповідала їх стандартам, які прийняті для відповідних вікових періодів. Найбільш швидкий ріст і розвиток відмічались у перші три місяці життя, потім вага тіла збільшувалась повільніше, і у віці 6,5-12 місяців вона була максимальною – 2000-2200 г для курей леггорн 2200-2400 г – для курей породи нью-гемпшир. Абсолютна маса печінки курей породи леггорн поступово зростала майже до 12-місячного віку (весняна яйцекладка), а під час линяння і статевого спокою (18 місяців) значно зменшувалась (на 24%) і відповідала масі органу в період статевого дозрівання (4,5 місяці). З початком нового циклу яйцекладки (20 місяців) маса печінки знову зростала, але не досягала рівня при весняній яйцекладці (12 місяців). Відносна маса печінки з віком поступово зменшується, за винятком маси при зимовій яйцекладці (6,5 місяців) і при весняній (12 місяців). В ці періоди відносна маса печінки не змінюється. Абсолютна маса обох відділів яйцепроводу збільшується в багато разів до початку яйцекладки і максимальних показників досягає під час весняної яйцекладки, перевищуючи в 4-8 разів їх масу в період статевого дозрівання (4,5 місяці), а з припиненням кладки яєць різко зменшується і досягає рівня в період статевого дозрівання. З початком нового циклу яйцекладки обидва відділи яйцепроводу знову збільшуються в 2-4 рази, але не досягають маси їх в 12-місячному віці. В печінці вміст небілкового азоту з віком також активно наростає, і максимальні показники його відмічені в 6,5 і 12 місяців, тобто на початку і під час найбільш інтенсивної весняної яйцекладки, а в період статевого спокою кількість його зменшується на 20-25%; з початком повторного циклу яйцекладки відмічається новий підйом, але в меншій мірі, ніж в попередні періоди статевої активності.

Ключові слова: печінка, кури, яйцекладка, порода, білок, азот, обмін речовин



UDC 004.584

**SIMULATION OF THE PROCESS OF CREATING A SOCIAL NETWORK
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ СОЦІАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ****Kravchenko S.M. / Кравченко С.М.***senior lecturer / старший викладач*

ORCID: 0000-0002-5895-9615

Levkivskiy V. L. / Левківський В. Л.*senior lecturer / старший викладач*

ORCID: 0000-0002-1643-0895

Marchuk D.K. / Марчук Д.К.*Postgraduate student / аспірант*

ORCID: 0000-0001-8675-8047

Aliexsieiev B.O. / Алексеев Б.О.*student / студент**Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine**Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна*

Анотація. Об'єктом дослідження є аналіз та застосування сучасних технологій при створенні соціальних мереж. У статті представлені моделі та методи дослідження в соціальних мережах.

За допомогою UML моделювання здійснено процес проектування та реалізація алгоритмів роботи системи, представлено клієнтську та серверну частину архітектуру соціальної мережі.

У статті пропонується створення соціальної мережі для україномовної аудиторії за допомогою платформи Node.js та бібліотеки React.js.

Ключові слова: соціальна мережа, алгоритм, аналіз, UML-моделювання, платформа Node.js, бібліотека React.js.

Вступ.

В останні роки соціальні мережі набули великої популярності як на території України, так і в усьому світі. З кожним днем все більше і більше користувачів мережі Інтернет реєструються і починають свою активну діяльність у все нових соціальних мережах, які міцно увійшли до списку найвідвідуваніших українськими користувачами сайтів [1].

Люди діляться схожими групами в соціальних мережах. Кар'єрні інтереси, соціальні інтереси, релігійні підрозділи, спільні друзі та спільні переконання є одними з типових зв'язків, які поділяють і живуть члени спільноти. Соціальна мережа полегшує зв'язки між різними людьми з однаковими інтересами, щоб стати друзями серед членів. Соціальні мережі вивчалися багатьма вченими в різних галузях і в широкому спектрі тем, таких як конфіденційність та ідентичність, а також соціальний капітал спільнот. Найпопулярніші онлайн-соціальні мережі об'єднують понад 20 мільйонів користувачів і понад 150 різних ремесел. Користувач соціальних мереж може написати свою автобіографію у сфері освіти та роботи та може запросити друзів, щоб порекомендувати її іншим або співпрацювати, починаючи нові сфери роботи. Таким чином, ці мережі є однією з областей, які віддалені від майбутнього великих соціальних мереж [1].



Аналіз останніх досліджень.

Перший напрямок аналізу соціальних мереж полягав у пошуку форм їх візуалізації. Однією із з перших форм представлення соціальних мереж були соціограми (Я. Морено 1953 р.) [3-5]. Я. Морено першим поставив задачу аналізу міжособистісних відносин в малих групах. Аналізуючи структуру та динаміку малих груп, Я. Морено представив людей та зв'язки між ними у двовимірному просторі за допомогою точок та відрізків, що їх з'єднували. Точки відповідали людям, а відрізки — зв'язкам. Таке представлення, що отримало назву соціограми, часто застосовувалось для представлення структури малих груп [3], зокрема: спільноти еліт (Е. О. Laumann та Ф. У. Раррі, 1976 р., Е. О. Laumann та Д. Кноке, 1987 р.); внутрішньо-корпоративних зв'язків (Д. Н. Левіне, 1972 р.); структури ролей в групах (Р. Л. Бреїгер, С. А. Воорман та Р. Арабіє, 1975 р., Р. С. Бурт 1976 р., 1982 р.); шаблонів взаємодії в малих групах (А. К. Ромней та К. Фауст, 1982 р., Л. С. Фріман, С. С. Фріман та А. Г. Мічелсон, 1989 р.).

Представлення соціограм в матричній формі дозволило вивчати соціальні системи математичними методами. Для опису соціальних груп почали застосовувати чисельні характеристики такі, як центральність актора та централізація групи, обопільність та взаємність, структурний баланс, транзитивність. Пізніше сформулювали математичні визначення понять соціальна група, ізольованість, популярність, престиж, баланс, транзитивність, угруповання, підгрупа, соціальна згуртованість, соціальна позиція, соціальна роль, обопільність, взаємність, обмін, вплив, домінантність, конформізм тощо [3, 5-6].

Другий напрямок аналізу соціальних мереж отримав назву структурний баланс (Heider F. 1946, Т. М. Ньюкомб 1953) [3, 7]. Він стосується визначення позитивних та негативних зв'язків в групі,

ISSN 1997-9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 2 перевіряє тезису про те, що ворог мого ворогу — мій друг. Структурний баланс сприяв вивченню транзитивності мереж з урахуванням триплетів — тернарних відношень акторів. В структурному балансі введено означення структурної еквівалентності, яку приписують акторам з однаковими множинами зв'язків в мережі (Ф. Лоррєйн та Н. С. Вайт 1971) [8]. На базі структурної еквівалентності сформовано поняття роль, соціальний статус, соціальна позиція та розроблено основи клас-теризації соціальних мереж [8-10].

Третій напрямок аналізу мереж базується на застосуванні математичної статистики. Д. А. Девіс, Р. В. Голланд та С. Лейнхардт в серії своїх праць в 1970-х роках [3] запропонували низку ймовірнісних розподілів випадкових направлених графів для перевірки різних структурних тенденцій соціальних мереж. В 1980-х роках розроблено моделі для роботи з різними типами соціальних мереж, які дозволяють аналізувати бінарні, тернарні та багатоарні відношення. [5, 9].

Аналіз наукових розвідок засвідчує той факт, що соціальні мережі та соціальні медіа мають надзвичайну зацікавленість у наукових колах. Так, київський дослідник О. Курбан, при дослідженні ролі та місця соціальних медіа



в роботі PR-фахівців та систематизувавши інструменти сучасного SMM-менеджера, наголошує на тому, що застосування новітніх інтернет-технологій у сфері зв'язків з громадськістю і є одним з актуальних профільних трендів сьогодення [2, с. 1].

Основна частина.

Аналіз та дослідження соціальних мереж

Соціальні мережі становлять особливий інтерес до різних соціальних досліджень, використовують кількісні (обчислювальна статистика, машинне навчання та інших.) і звані «великі дані» методи обробки даних.

Обсяг та динамічність наборів даних соціальних мереж потребують спеціалізованої автоматизованої обробки для аналізу даних за короткий період часу.

1. Структурний аналіз та аналіз посилань аналізують поведінку посилань у соціальних мережах для пошуку відповідних вузлів, зв'язків між вузлами тощо.

2. Динамічний та статичний аналіз. Статичний аналіз частіше використовують у бібліографічних мережах, ніж у потокової передачі. Статичний аналіз передбачає поступову зміну даних соціальної мережі з часом, а аналіз всієї мережі можна виконувати пакетному режимі. Однак динамічний аналіз використовується в соціальних мережах, де такі посилання генеруються швидко та у великій кількості.

Основні напрямки дослідження соціальних мереж.

Теорія графів була, мабуть, найважливішим методом дослідження у ранній історії досліджень соціальних мереж. Цей підхід використовується для аналізу соціальних мереж для виявлення важливих характеристик мережі (зв'язків та мережевих вузлів). Користувач соціальної мережі визначається як первинний фактор, що впливає на дії та думки інших користувачів засобами, доступними в соціальних мережах. Аналіз соціальних мереж із використанням теорії графів довів свою ефективність на великих наборах даних. В принципі, можна виділити два основні напрямки досліджень із використанням теорії графів [12].

1. Ідентифікація спільноти з використанням ієрархічної кластеризації. Формування вузлів, мабуть, найважливіша особливість соціальних мереж. Користувачі із спільними інтересами утворюють спільноти, що призводить до сильної структури розділу. Виявлення угруповань як у соціальних мережах, так і в реальному світі - дуже складна процедура, оскільки їх важко виявити. Важливо використовувати правильні інструменти для виявлення та розуміння поведінки онлайн-спільнот, оскільки їх можна застосовувати для моделювання динаміки домену, до якого належать користувачі. В цілому, для пошуку спільнот можна використовувати різні методи кластеризації, але одним із найефективніших є метод ієрархічної кластеризації. Потім він використовується для поділу мережі на спільноти

2. Рекомендації для спільнот соціальних мереж на основі групових відносин в соціальних мережах методи спільної фільтрації можуть використовуватися для формування одного з трьох класів рекомендаційних систем, які можна використовувати для встановлення асоціацій між



користувачами. Одним із таких варіантів використання є так званий підхід EntreeC, який використовується для рекомендації ресторанів.

Вибір інструментальних засобів при побудові соціальної мережі

Програмний продукт буде використовувати публічно-клієнтську архітектуру з використанням користувачами організованої внутрішньої бази даних, її зручно використовувати так як розділяє клієнтську та серверну частину, клієнт спілкується завдяки запитів с API сервера.

Клієнтська частина буде використовувати React.js. Важливою концепцією React є компоненти. Дана абстракція дозволяє збирати великі програми з маленьких «шматочків». Вони являють собою придатні до повторного використання об'єкти. React – це декларативна, ефективна і гнучка JavaScript бібліотека для створення користувацьких інтерфейсів. Вона дозволяє збирати складний UI з маленьких ізольованих шматочків коду (рис. 1.).

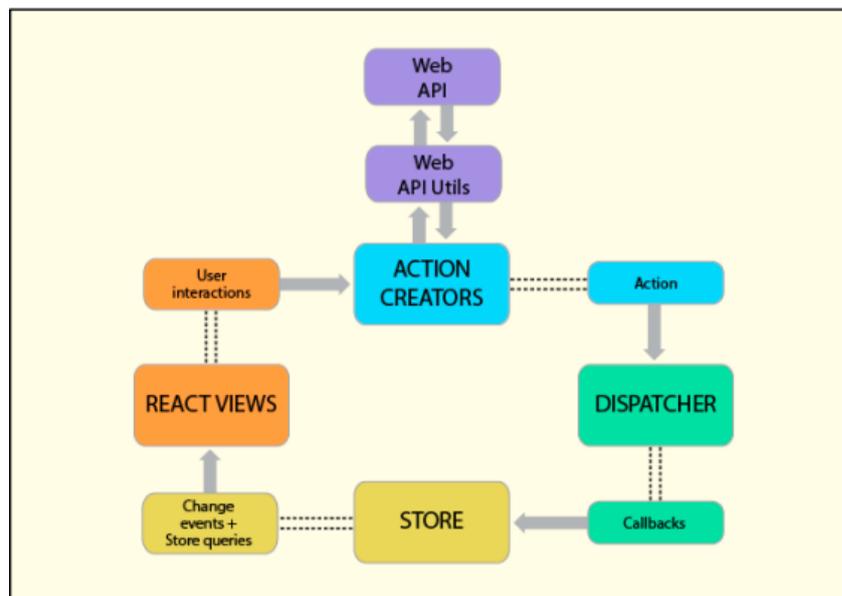


Рисунок 1 - Архітектура компонентів React.js

Серверна частина взаємодії користувача з внутрішньою базою даних буде організовуватися завдяки Node.js. – платформи з відкритим кодом для виконання високопродуктивних мережових застосунків, написаних мовою JavaScript. Якщо раніше Javascript застосовувався для обробки даних в браузері користувача, то node.js надав можливість виконувати JavaScript-скрипти на сервері та відправляти користувачеві результат їхнього виконання. Платформа Node.js перетворила JavaScript на мову загального використання з великою спільнотою розробників. Node.js спроектований для побудови масштабованих мережових додатків [13]. На рисунку 2 представлена архітектура модулів Node.js.

Mongodb - платформа даних для розробників, яка надає послуги та інструменти, необхідні для швидкого створення розподілених додатків відповідно до потреб користувачів у продуктивності та масштабів (рис. 7) [14].

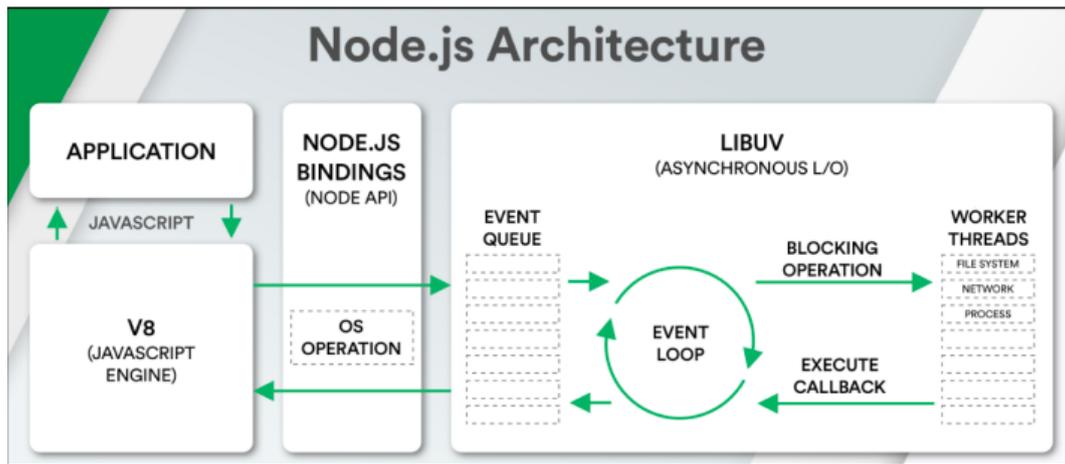


Рисунок 2 - Архітектура модулів Node.js

Визначення варіантів використання та структури системи

Для загального уявлення функціонального призначення системи побудовано діаграму Use Case Diagram (рис. 3).

Для загального уявлення функціонального призначення системи побудовано діаграму Use Case Diagram (рис. 3).

У додатку користувач буде мати можливість створювати допис та переглядати профілі інших користувачів із можливість надіслати їм повідомлення. Також користувач може приєднатися до каналу, який публікує дописи по певній тематиці або ж створити свій власний канал із можливістю публікувати та змінювати дані каналу. У профілі користувача є посилання на статистику, яка формується із активності користувача.

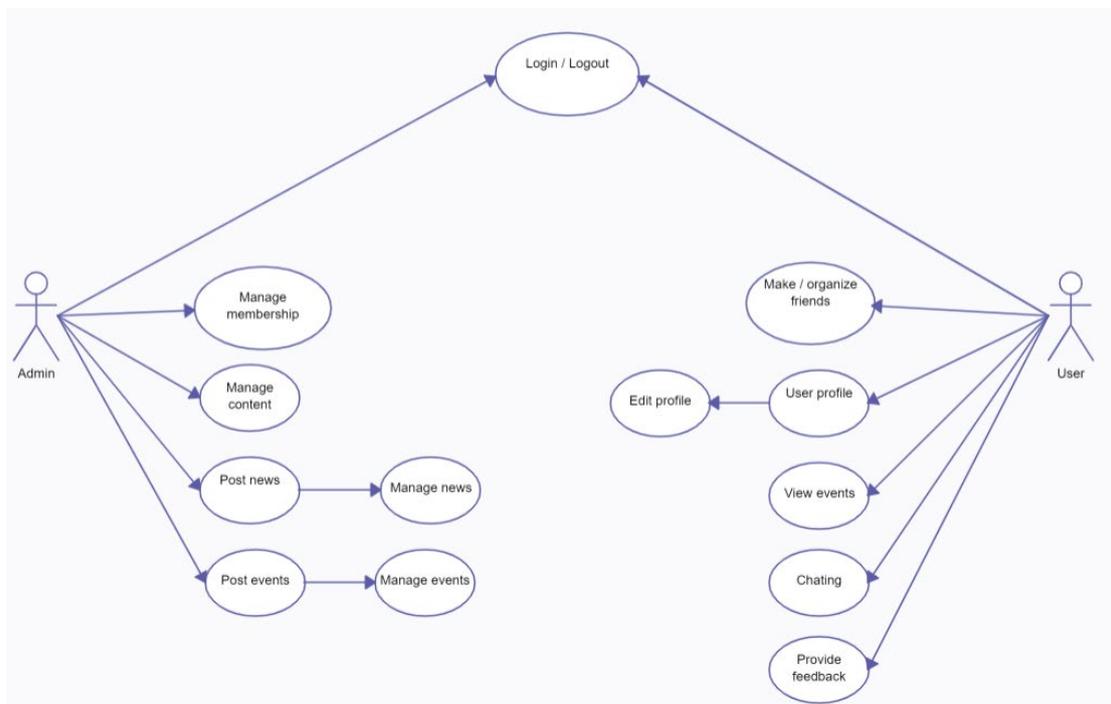


Рисунок 3 - Діаграма варіантів використання



Проектування та реалізація алгоритмів роботи системи

Представлено алгоритми роботи та стани програмної системи за допомогою діаграми діяльності (activity diagram) та діаграми бази даних. Представлена діаграма діяльності для створення допису зображена на рисунку 4. Опис діаграми активності (Створення допису):

1. Заповнення даних про допис.
2. Відправка даних на сервер.
3. Обробка даних на сервері.
4. Відправка результату обробки із сервера на клієнтську частину.

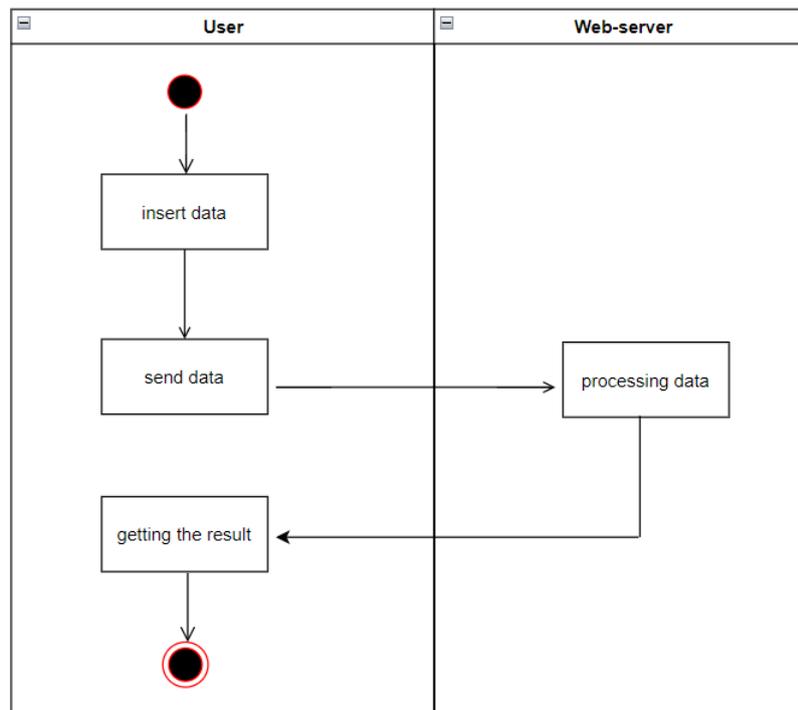


Рисунок 4 - Діаграма активності створення допису

Опис діаграми активності “Відправка повідомлення”.

1. Знайти користувача якому потрібно відправити повідомлення.
2. Перейти до чата з користувачем.
3. Відправити повідомлення.

На наступних діаграмах (рис.5,6) представлені діаграми компонентів клієнтської та серверної частини.

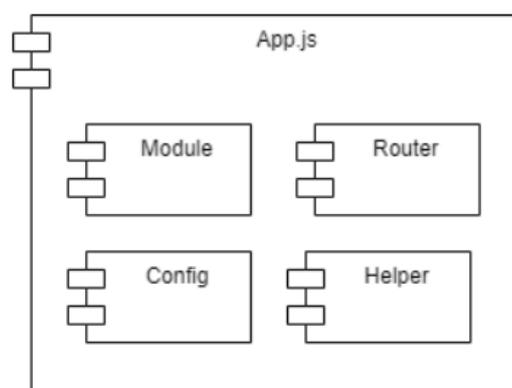


Рисунок 5 - Компоненти серверної частини

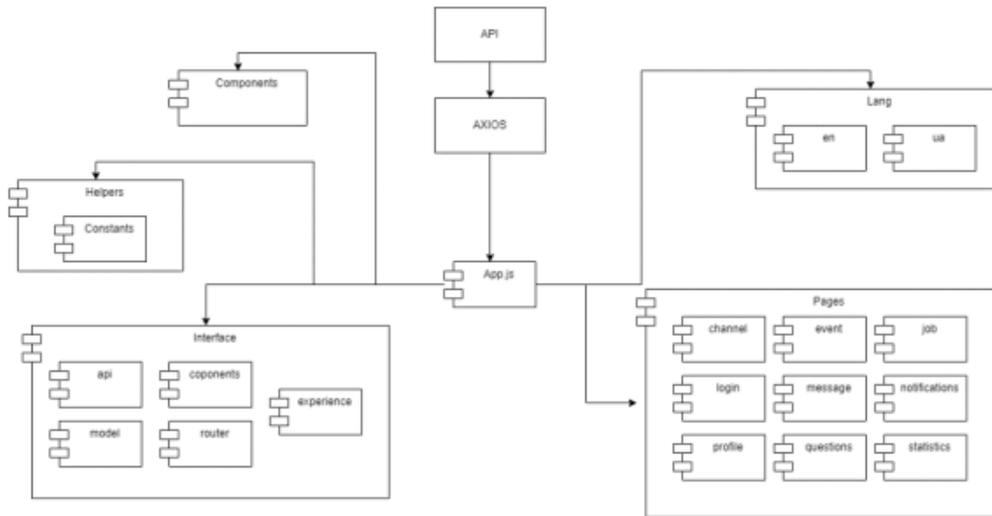


Рисунок 6 - Компоненти клієнтської частини

В створюваному веб-додатку буде використана база даних MongoDB. Бази даних MongoDB широко використовуються в сучасних електронних пристроях для зберігання даних різних додатків (програмами обміну миттєвими повідомленнями, веб браузером тощо). Реалізована база даних складається з 13 таблиць, які містять у собі всі дані для роботи програми.

Схема БД зображена на рис.7

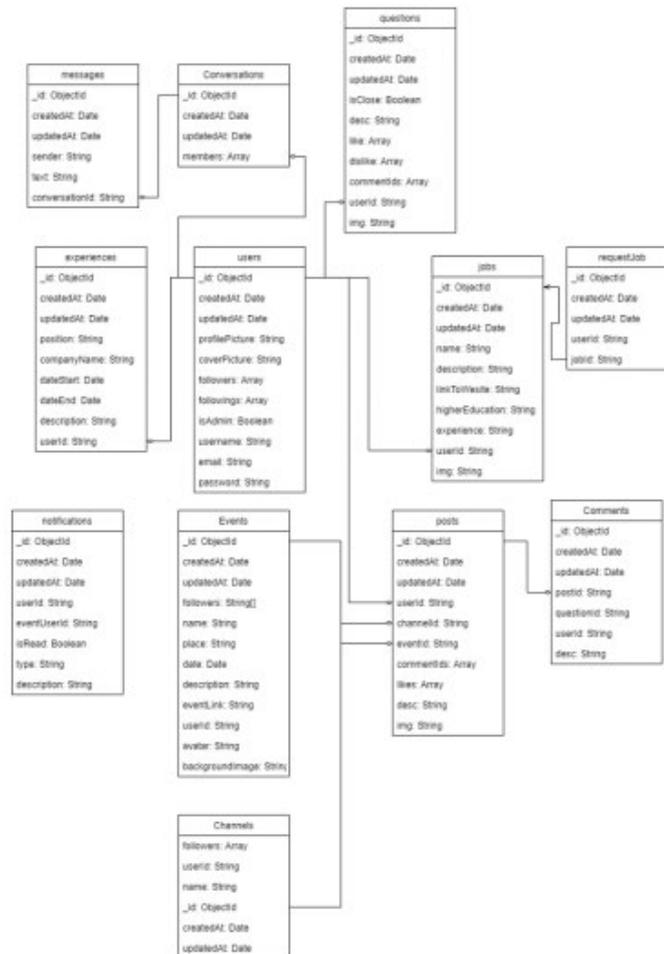


Рисунок 7 - Схема бази даних



Реалізація додатку соціальної мережі

Для реалізації доступу до баз даних використовується `mongodb`. Для описання необхідних налаштувань використовується клас `mongoose.connect`.

```
mongoose.connect(  
  "mongodb://localhost:27017/social",  
  { useUrlParser: true, useUnifiedTopology: true },  
  () => {  
    console.log("Connected to MongoDB");  
  }  
);
```

Підключення до ендпоінтів відбувається шляхом занесення відповідних модулів до `app.use` де перший параметр це обов'язковий шлях, а другий це модуль.

```
app.use("/api/auth", authRoute);  
app.use("/api/users", userRoute);  
app.use("/api/posts", postRoute);  
app.use("/api/experience", experienceRoute);
```

Таблиці до бази даних описуються у схемі `mongo`, де зазначаються поля та опції таблиці.

```
const mongoose = require("mongoose");  
const CommentSchema = new mongoose.Schema(  
  {  
    userId: {  
      type: String,  
      required: true,  
    },  
    postId: {  
      type: String,  
      default: ''  
    },  
    questionId: {  
      type: String,  
      default: ''  
    },  
    desc: {  
      type: String,  
      required: true,  
      max: 500,  
    },  
  },  
  { timestamps: true }  
);  
module.exports = mongoose.model("Comment", CommentSchema);
```



Для створення кінцевої точки використовується router які імпортується із бібліотеки express. У цих кінцевих точках виконуються потрібні функції обробки даних. Для обробки даних із бази даних імпортується описана схема, а потім застосовуються функції mongo з потрібними параметрами.

```
const router = require("express").Router();
const Comment = require("../models/Comment");
router.get("/", async (req, res) => {
  try { const comments = await Comment.find();
    res.status(200).json(comments);
  } catch (err) {
    res.status(500).json(err);
  }
});
```

Головний файл з якого починається старт клієнтської частини так який об'єднує певні глобальні компоненти це App.js

```
import "./main.css";
export const UserContext = createContext(); function App() {
  const { user } = useContext(AuthContext);
  return (
    <Router>
    <UserContext.Provider value={user}>
    <Switch>
    {user ? (
      <>
      <Topbar />
      <div className="homeContainer">
      .....
      </div>
      </>
    ) : (
      <>
      <Route path="/login">
      <Login />
      </Route>
      <Route path="/register">
      <Register />
      </Route>
      </>
    )}
    </Switch>
    </UserContext.Provider>
    </Router>
  );
}
```



export default App;

Інтерфейс сервісу соціальної мережі.

При першому заході у додаток потрібно авторизуватися, так як уся наступна робота буде виконуватися від імені авторизованого користувача.

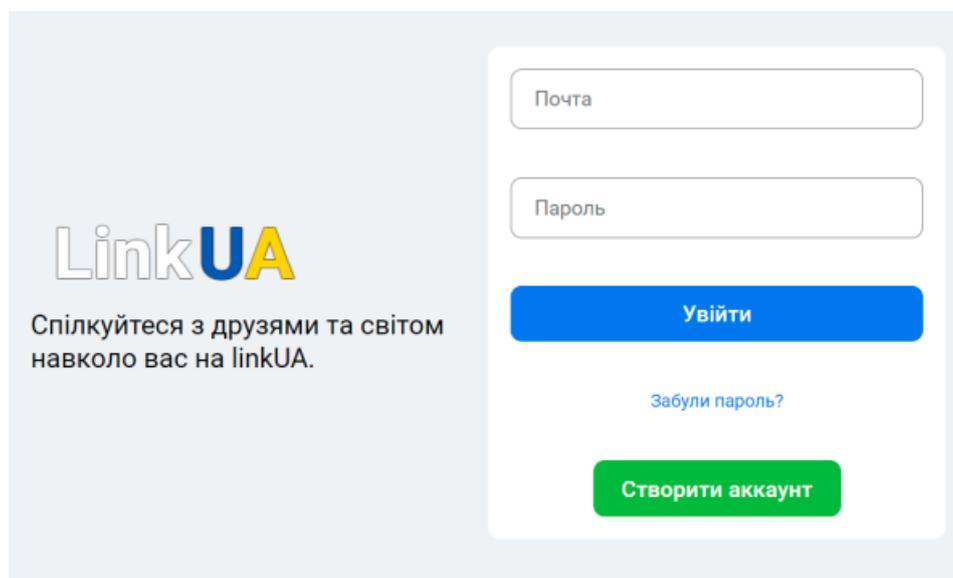


Рисунок 8 - Авторизація на сервісі

Після авторизації на сервісі автоматично перенаправляється на головну сторінку. Структура сайту поділяється на: Навігаційну панель, шапку сайту, бокове меню інформації та центр який містить інформацію про поточну сторінку. У навігаційній панелі можна переглянути список доступних сторінок, серед яких є: Стінка, Чати, Канали, Запитання, Робота, Події, Статистика. При натисканні на відповідне посилання перейти на потрібну сторінку (рис.9-10,11).

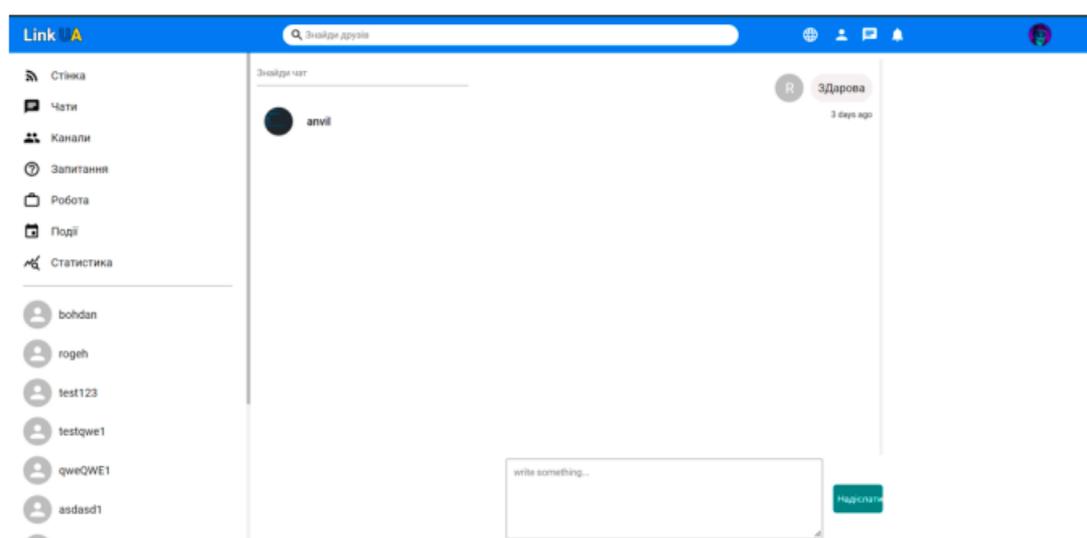


Рисунок 9 - Сторінка чатів

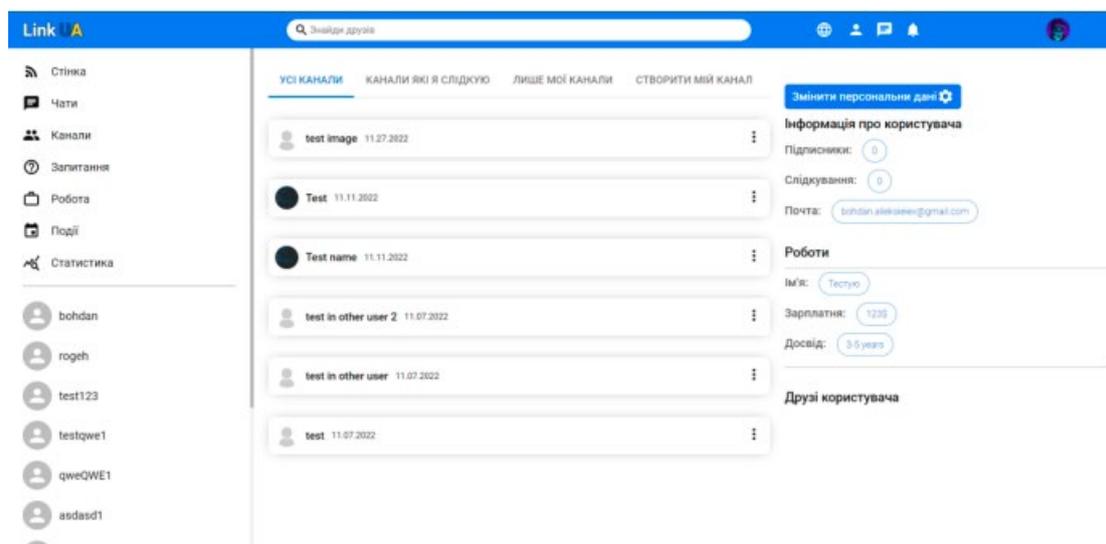


Рисунок 10 - Сторінка каналів

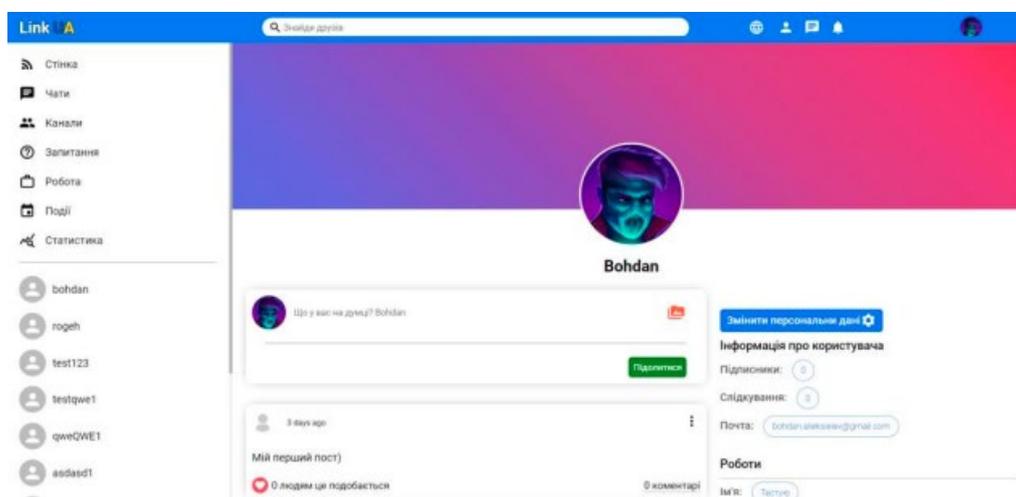


Рисунок 11 - Сторінка профілю користувача

Висновки.

В данній статті було розглянуто найважливіші алгоритми і сценарії використання сервісу, та проаналізовано взаємодію системних компонентів між собою. Було представлено архітектуру веб-додатку та необхідні умови для розгортання. Продемонстровано основні сторінки та вікна з їх функціоналом у додатку. За допомогою UML моделювання здійснено процес проектування та реалізація алгоритмів роботи системи, представлено клієнтську та серверну частину архітектуру соціальної мережі.

Література.

1. Mohamed Y. Mohamed AL-SABAAWI. The Comparative Analysis of Social Network on In International and Local Corporate Business. International Journal of Advances in Engineering & Technology. Vol. 7, Issue 3, 2014, pp. 723-732.
2. Kurban O. Social networks in the field of PR. Bulletin of the Book Chamber. Kyiv, 2014. No. 10. P. 1–3. [in Ukrainian].



3. Wasserman S. Social Network Analysis: Methods and Applications / S. Wasserman, K. Faust. — Cambridge: Cambridge University Press, 1994 — 857 p.
4. Martino F. Social Network Analysis: A brief theoretical review and further perspectives in the study of Information Technology / F. Martino, A. Spoto // Psychology Journal. — 2006. — Vol. 4, No 1. — P. 53—86.
5. Scott J. Social network analysis developments, advances, and prospects / J. Scott // Social Network Analysis and Mining. — 2011. — Vol. 1, Issue 1. — P. — 26.
6. Butts C. T. Social network analysis. A methodological introduction // C. T. Butts // Asian Journal of Social Psychology. — 2008. — Vol. 11. — P. 13—41.
7. Easley D. Networks, Crowds, and Markets : Reasoning about a Highly Connected World / D. Easley, J. Kleinberg. — Cambridge University Press, 2010. — 727 p.
8. Lorrain F. Structural equivalence of individuals in social networks / F. Lorrain, H. C. White // The Journal of Mathematical Sociology. — 1971. — Vol. 1, No. 1. — P. 49—80.
9. Carrington J. Models and Methods in Social Network Analysis / J. Carrington, S. Wasserman, G. Roberts. — Cambridge: Cambridge University Press, 2005 — 345 p.
10. Borgatti S. P. Notions of Position in Social Network Analysis / S. P. Borgatti, M. G. Everett // Sociological Methodology. — 1992. — Vol. 22. — P. 1—35.
11. Вплив соціальних мереж на людину [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://sites.google.com/site/socialnimereziart/vplivsotsialnih-merez-na-ludinu>.
12. Теорія графів і соціальні мережі. URL: <https://medium.com/egghead-science/778c92d20cea> (дата звернення 01.11.2021).
13. Офіційна документація React.js [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://react.dev/blog/2023/03/16/introducing-react-dev>.
14. Офіційний сайт платформи MongoDB [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mongodb.com/home>

Abstract. *The object of the research is the analysis and application of modern technologies in the creation of social networks. The article presents models and research methods in social networks.*

With the help of UML modeling, the process of designing and implementing the algorithms of the system was carried out, the client and server part of the architecture of the social network were presented.

The article proposes the creation of a social network for the Ukrainian-speaking audience using the Node.js platform and the React.js library.

Keywords: *social network, algorithm, analysis, UML modeling, Node.js platform, React.js library.*

Стаття відправлена: 18.11.2023 р.

© Кравченко С.М.



УДК 528.48

ANALYTICAL DESIGN OF THE LINEAR STRUCTURE PROFILE
АНАЛІТИЧНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ПРОФІЛЮ ЛІНІЙНИХ СПОРУД**Radov S.G. / Радов С.Г.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0009-0003-5721-996X

Kuznetsova O. V. / Кузнецова О.В.*senior lecturer / старший викладач*

ORCID: 0009-0006-2189-7306

Cherkasy State Technological University,

Cherkasy, Shevchenko boulevard 460, 18006

Черкаський державний технологічний університет,

м. Черкаси, бульвар Шевченка 460, 18006

Анотація. Стаття присвячена оптимізації проектного профілю лінійних споруд аналітичними методами за основними критеріями оптимальності (мінімізація робочих позначок, баланс і мінімум земляних робіт, граничне значення проектного ухилу). Розглянуто аналітичне проектування методами найменших квадратів та квадратичного програмування. Розроблено методику врівноваження проектних позначок точок перегину профілю, в тому числі з урахуванням вагових коефіцієнтів впливу робочих позначок на баланс земляних робіт. Показано, що для врахування додаткових умов оптимізації щодо суми робочих позначок та граничного ухилу, доцільно використовувати метод квадратичного програмування. Наведені приклади аналітичного проектування повздожнього профілю ділянки автомобільної дороги.

Ключові слова: лінійна споруда, повздожній профіль, робоча позначка, критерії оптимальності, метод найменших квадратів, метод квадратичного програмування.

Вступ.

У практиці проектування лінійних споруд використовується, як правило, графоаналітичний спосіб з поступовим наближенням до прийнятних проектних рішень. Аналітичний спосіб є більш перспективним для автоматизації процесу проектування, забезпечення критеріїв оптимальності та точності розрахунків.

Дослідження аналітичного проектування профілю лінійних споруд наведені в працях [1,2,3,4] та інших. В праці [4] наводиться методика врівноваження робочих позначок методом найменших квадратів, але без забезпечення балансу земляних робіт. В статті [3] запропоновано складний алгоритм послідовних наближень для проектування профілю із забезпеченням балансу та мінімуму площ насипу і виїмки ґрунту вздовж траси. В працях [1,2] найбільш повно розглянуте аналітичне проектування робочих позначок з додержанням балансу і мінімуму площ насипу і виїмки та з урахуванням різних критеріїв оптимальності і вагових коефіцієнтів, яке ґрунтується на наближеному визначенні проектних ухилів і позначок центрів тяжіння ділянок профілю.

В основу аналітичного проектування повздожнього профілю лінійних споруд покладено оптимізацію методами найменших квадратів (МНК) та квадратичного програмування (МКП) цільових функцій $F = f(r)$ від робочих позначок (r_i), які залежать від фактичних (H_i) та проектних (Z_i) позначок рельєфних точок (рис. 1)



$$r_i = Z_i - H_i \quad (i=1,2,\dots,n). \tag{1}$$

В залежності від вигляду цільової функції прийнято розділяти наступні способи оптимізації [1, с. 108]:

а) мінімізації робочих позначок – $F = \sum r^2 = \min$;

б) мінімізації балансових робочих позначок – $F = \sum pr^2 = \min$, де p – коефіцієнт впливу робочої позначки на баланс земляних робіт.

Крім додаткових умов оптимізації $\sum r = 0$ та $\sum pr = 0$ метод квадратичного програмування дозволяє задавати граничне значення (u_{zp}) проектних ухилів (u) на профілі у вигляді нерівності $|u| \leq |u_{zp}|$.

Узагальнення досвіду використання різних технологій для інженерно-геодезичного проектування лінійних об'єктів зумовлює необхідність застосування строгого способу оптимізації проектних рішень з можливістю автоматизації.

Метою статті є розробка алгоритму оптимізації проектного профілю лінійних споруд аналітичними методами.

Результати і пояснення.

Проектування починається з побудови фактичного повздовжнього профілю (рис. 1) та встановлення ділянок з однаковим проектним ухилом між точками з локальними екстремальними значеннями фактичних позначок (наприклад, ділянки 1-5, 5-9 та 9-12).

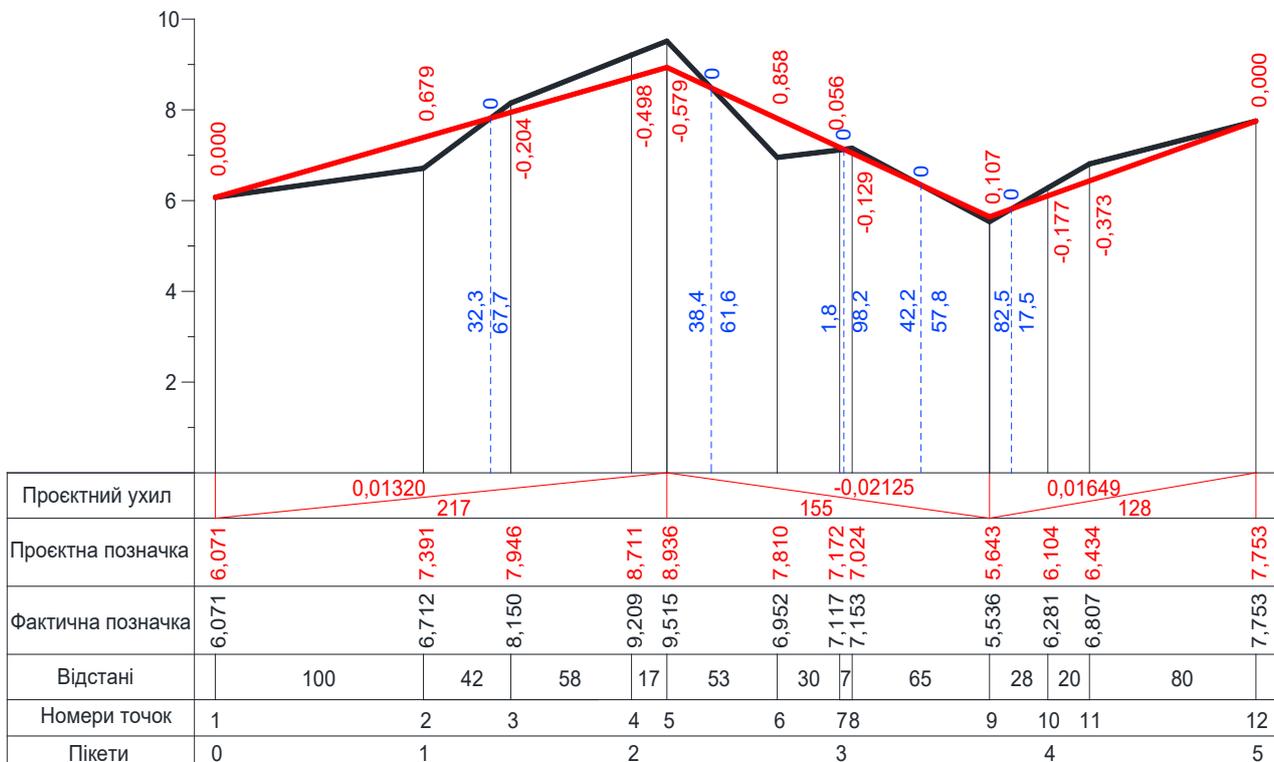


Рисунок 1 – Повздовжній профіль лінійної споруди при $\sum pr^2 = \min$.

Проектний ухил на окремій ділянці профілю (рис. 2) визначається за формулою:



$$u_j = \frac{Z_{j,k} - Z_{j,0}}{D_j}, \tag{2}$$

де $Z_{j,0}$ та $Z_{j,k}$ – проєктні позначки початкової та кінцевої точок j ділянки профілю ($j=1,2,3,\dots,m$) з проєктним ухилом u_j ; m – кількість ділянок профілю з однаковим нахилом; $(k+1)$ – кількість точок ($i=0,1,2,\dots,k$) на j ділянці профілю; $D_j = X_{j,k} - X_{j,0}$ – довжина j ділянки профілю; $X_{j,k}$ – пікетажне положення відповідної точки профілю.

Проєктні позначки ($Z_{j,i}$) проміжних точок ділянки профілю визначаються за проєктною позначкою ($Z_{j,0}$) початкової точки відповідної ділянки з ухилом u_j (рис. 2):

$$Z_{j,i} = Z_{j,0} + u_j x_{j,i}, \tag{3}$$

де $x_{j,i} = X_{j,i} - X_{j,0}$ – віддалення поточної точки від початкової точки j ділянки профілю з однаковим ухилом ($i=1,2,3,\dots,k$).

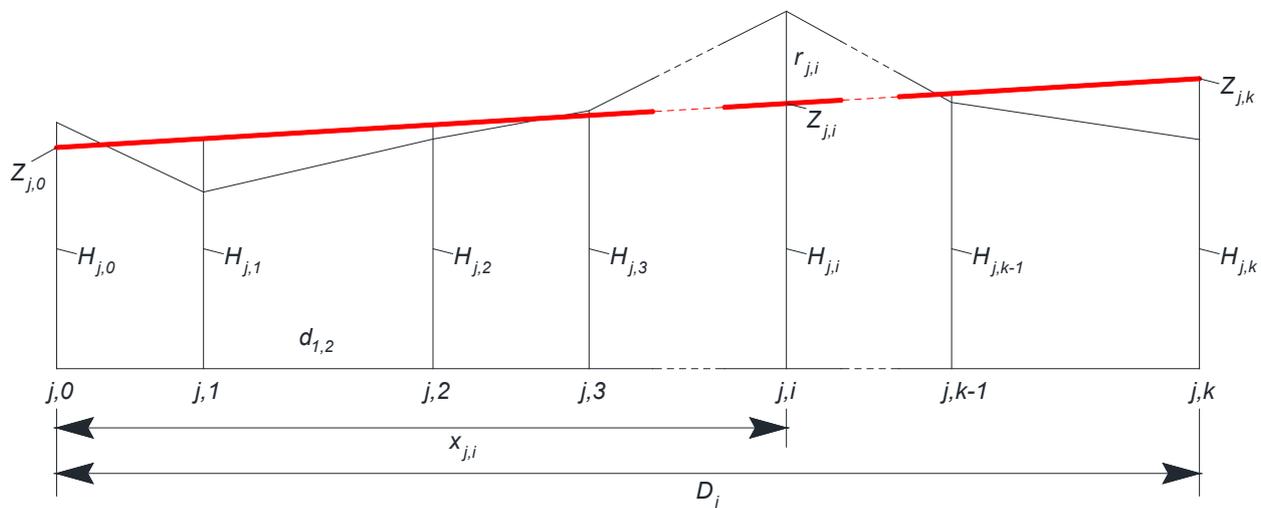


Рисунок 2 – Ділянка профілю з однаковим повздовжнім ухилом.

Позначення: j – номер ділянки; D_j – довжина ділянки; i ($i=1,2,\dots,k-1$) – номери проміжних точок на ділянці; $x_{j,i}$ – віддалення поточної точки від початку ділянки; $d_{i,i+1}$ – відстань між суміжними точками профілю.

Одним з критеріїв оптимальності проекту лінійної споруди є баланс земляних робіт. Якщо прийняти, що ширина лінійної споруди приблизно однакова на усіх ділянках, то баланс площ насипу (S_H) та виїмки (S_B) на повздовжньому профілі призводить до балансу земляних мас (ΔS):

$$\Delta S = \frac{|S_H - S_B|}{S_H + S_B} \cdot 100\%. \tag{4}$$

Площа елементарної ділянки насипу або виїмки, розташованої між суміжними точками профілю з робочими позначками «0» та « $\pm r$ » (наприклад, точки 1-2 на рис. 1), залежить від величини робочої позначки (r) та відстані (d) між точками і визначається за відомою формулою площі трикутника:

$$S = \frac{1}{2} d \cdot r, \tag{5}$$



де r та d – основа та висота трикутника.

Аналогічно визначаються елементарні площі на ділянках між точками з різними за знаками робочими позначками (наприклад, ділянка між точками 2-3 на рис. 1). В цих випадках попередньо потрібно визначити відстані від точки «нульових» робіт до точок профілю:

$$\begin{cases} d_{i,0} = \frac{|r_i|}{|r_i| + |r_k|} \cdot d_{i,k}; \\ d_{k,0} = \frac{|r_k|}{|r_i| + |r_k|} \cdot d_{i,k}, \end{cases} \quad (6)$$

де r_i , $d_{i,0}$ та r_k , $d_{k,0}$ – основи та висоти відповідних трикутників. Знак робочих позначок визначає наявність на цій ділянці насипу або виїмки.

Випадок, коли на суміжних точках i та k профілю робочі позначки одного знаку (наприклад, між точками 3-4 на рис. 1), приводить до двох трикутників з різними основами (r_i , r_k) та однією висотою ($d_{i,k}$).

Оскільки кожна проміжна робоча позначка має враховуватись для обчислення площ попереднього та наступного трикутника, висоти для проміжних точок визначаються як різниця пікетажного положення наступної (X_{i+1}) та попередньої (X_{i-1}) точок:

$$d_i = X_{i+1} - X_{i-1}. \quad (7)$$

Для **аналітичного проектування параметричним способом МНК** прийемо за невідомі параметри проектні позначки початкових ($Z_{j,0}$) і кінцевих ($Z_{j,k}$) точок ділянок профілю з однаковим проектним ухилом та встановимо, що їх наближені значення Z' дорівнюють фактичним позначкам H (рис. 2):

$$\begin{cases} Z'_{j,0} = H_{j,0}; \\ Z'_{j,k} = H_{j,k}. \end{cases} \quad (8)$$

Для обчислення наближених значень проектних ухилів (u'_j) та проектних позначок ($Z'_{j,i}$) проміжних точок профілю скористаємося формулами (2, 3).

Робочі позначки r_i ($i=1,2,3,\dots,n$) пов'язані з параметрами $Z_{j,0}$ та $Z_{j,k}$ ($j=1,2,3,\dots,m$) параметричними рівняннями зв'язку, які у загальному випадку мають вигляд:

$$r_i = f_i(Z_{1,0}; Z_{1,k}=Z_{2,0}; Z_{2,k}=Z_{3,0}; \dots; Z_{m-1,k}=Z_{m,0}; Z_{m,k}), \quad (9)$$

або в прийнятих позначеннях (рис. 2) для i проміжної точки на j ділянці:

$$r_{j,i} = (Z_{j,0} + u_j x_{j,i}) - H_{j,i} = Z_{j,0} \left(1 - \frac{x_{j,i}}{D_j} \right) + Z_{j,k} \frac{x_{j,i}}{D_j} - H_{j,i}. \quad (10)$$

де j – номер ділянки; D_j – довжина j ділянки; i ($i=1,2,\dots,k$) – номер поточної проміжної точки на j ділянці; $x_{j,i} = X_{j,i} - X_{j,0}$ – віддалення i поточної точки від початку j ділянки.

Перейдемо від рівняння зв'язку (10) для i проміжної точки на j ділянці до параметричного рівняння поправок (робочих позначок $r_{j,i}$):

$$a_{j,0} \Delta_{j,0} + a_{j,k} \Delta_{j,k} + l_{j,i} = r_{j,i}, \quad (11)$$

де $\Delta_{j,0}$, $\Delta_{j,k}$ – поправки до наближених значень проектних позначок $Z'_{j,0}$, $Z'_{j,k}$.



Коефіцієнти параметричних рівнянь поправок для (i) проміжної точки, що розташована між початковою ($j,0$) та кінцевою (j,k) точками (j) ділянки, згідно (10) визначаються за формулами:

$$a_{j,0} = 1 - \frac{x_{j,i}}{D_j} \quad \text{та} \quad a_{j,k} = \frac{x_{j,i}}{D_j}. \quad (12)$$

Вільний член параметричного рівняння поправок визначається для кожної точки за наближеним значенням проектних ($Z'_{j,i}$) та фактичних ($H_{j,i}$) позначок точок профілю:

$$l_{j,i} = Z'_{j,i} - H_{j,i}. \quad (13)$$

Напишемо в матричному вигляді систему параметричних рівнянь поправок, приймаючи за поправки робочі позначки в рельєфних точках профілю (тобто, робочі позначки r_i – це поправки до фактичних позначок точок H_i для одержання їх проектних значень Z_i):

$$A \cdot \Delta + L = R, \quad (14)$$

де A – матриця коефіцієнтів (12) параметричних рівнянь поправок;

L – вектор вільних членів (13) параметричних рівнянь поправок;

R – вектор робочих позначок (11) точок профілю;

Δ – вектор поправок до наближених значень проектних позначок.

Для визначення невідомих поправок Δ_j ($j=1,2,3,\dots,m$) складається система нормальних рівнянь:

$$(A^T P A) \cdot \Delta + (A^T P L) = 0, \quad (15)$$

де P – діагональна матриця вагових коефіцієнтів.

Робочі позначки точок профілю визначаються за формулою (11). Остаточний контроль врівноваження полягає в порівнянні робочих позначок, одержаних за формулами (11) та (1). Для цього за врівноваженими значеннями обраних параметрів

$$Z_j = Z'_j + \Delta_j \quad (16)$$

обчислюємо проектні ухили (2), проектні позначки усіх проміжних точок профілю (3) та робочі позначки (1).

Контроль обчислення $[pr^2]$ при параметричному способі врівноваження можна виконати за формулами [5, с. 39]:

$$[pr^2] = [p_i a_{i,1} l_i] \cdot \Delta_1 + [p_i a_{i,2} l_i] \cdot \Delta_2 + \dots + [p_i a_{i,n} l_i] \cdot \Delta_m + [p_i l_i l_i]. \quad (17)$$

Для мінімізації робочих позначок МНК встановлюємо рівні значення вагових коефіцієнтів (наприклад, $p_i=1$), тобто обчислюємо робочі позначки (r_i) при умові $\sum r^2 = \min$.

В нашому прикладі запроектуємо три ділянки з однаковими проектними ухилами – ділянки між точками 1-5, 5-9 та 9-12. Прийmemo, що під час проектування позначки початку та кінця траси не змінюються, тобто $Z_1=H_1$ та $Z_{12}=H_{12}$. Тоді невідомими параметрами залишаються проектні позначки Z_5 та Z_9 . Таким чином, наближені значення проектних позначок (Z') для точок 1, 5, 9 та 12 дорівнюють їх фактичним позначкам (H).



За результатами врівноваження МНК маємо $Z_5=9,038$ м та $Z_9=5,622$ м, $[r^2]=1,992$, а видимі на профілі площі насипу $S_H=82,10$ м² та виїмки $S_B=52,97$ м², що обчислені за відповідними робочими позначками r_i , показує, що баланс земляних робіт складає $\Delta S=21,6$ %.

Таким чином, оптимізація робочих позначок за умови $[r^2]=\min$ не забезпечує баланс земляних мас.

Спосіб мінімізації балансових робочих позначок реалізується МНК при умові $\sum pr^2=\min$ врахуванням вагових коефіцієнтів (p_i), які встановлюються за відстанями від поточної точки (i) до попередньої ($i-1$) та до наступної ($i+1$) точок:

$$p_i = d_{i-1,i} + d_{i,i+1}. \quad (18)$$

Відомо, що на результати врівноваження МНК впливає співвідношення ваг, а не їх величина. При цьому бажано, щоб вага окремих результатів була близькою до одиниці. На повздовжньому профілі лінійних споруд відстані між пікетними точками складають $d=100$ м, тому пропонується вагу встановлювати за формулами:

$$\begin{cases} p_1 = d_{1,2}/200; \\ p_i = (d_{i-1,i} + d_{i,i+1})/200 & (i = 2,3,4, \dots, n-1); \\ p_n = d_{n-1,n}/200, \end{cases} \quad (19)$$

де $d_{i,i+1} = X_{i+1} - X_i$ – відстань між точками профілю з номерами (i) та ($i+1$).

Контролем обчислення ваг за формулами (19) є їх сума:

$$\sum p_i = D/100, \quad (20)$$

де $D = X_n - X_1$ – загальна довжина траси.

За результатами врівноваження МНК маємо $Z_5=8,936$ м та $Z_9=5,643$ м, $[pr^2]=0,957$. Проектний профіль, побудований на основі мінімізації балансових робочих позначок за умови $[pr^2]=\min$, наведений на рис. 1. Як і очікувалося, показник балансу видимих на профілі площ земляних робіт значно покращився та складає 9,6 %.

Аналітичне проектування МКП полягає в знаходженні змінних параметрів при екстремальному (максимальному або мінімальному) значенні цільової функції другого порядку та системи лінійних обмежень [6, с. 91].

Слід відзначити, що використання метода квадратичного програмування для мінімізації робочих ($F=\sum r^2=\min$) або балансових робочих позначок ($F=\sum pr^2=\min$) без додаткових обмежень приводить до результатів, одержаних методом найменших квадратів.

З точки зору проектування лінійних споруд найбільш актуальними є забезпечення мінімуму робочих позначок, балансу земляних робіт та обмеження проектних ухилів граничними значеннями.

Ця задача може бути вирішена, наприклад, з використанням сервісу «Пошук рішення» електронних таблиць «Microsoft Excel» [1, с. 110]. Для цього за формулою (11) складається таблиця параметричних рівнянь поправок (робочих позначок r), яка включає вагу (p), коефіцієнти (a) та вільні члени (l) рівнянь. Ці розрахунки, як і в методі найменших квадратів, виконуються для



наближених значень обраних невідомих параметрів – проектних позначок початкових та кінцевих точок ділянок з однаковими ухилами. Далі резервуються клітинки для поправок (ΔZ) до невідомих параметрів (Z) та колонки для обчислення робочих позначок (r_i) і добутоків ($p_i r_i$) та ($p_i r_i^2$), в яких записуються формули відповідних величин:

$$- \text{робочих позначок } r_i = a_{i,1} \cdot \Delta_1 + a_{i,2} \cdot \Delta_2 + \dots + a_{i,m} \cdot \Delta_m + l_i;$$

$$- \text{добутків ваги на робочу позначку } p_i r_i \text{ та їх суму } \sum p_i r_i;$$

$$- \text{добутків ваги на квадрат робочих позначок } p_i r_i^2 \text{ та їх суму } \sum p_i r_i^2.$$

Для виконання оптимізації заповнюється форма «Параметри пошуку рішення»:

– вказується клітинка таблиці, в якій обчислюється значення цільової функції – $\sum p_i r_i^2$;

– позначається умова оптимізації – «Мінімум»;

– вказуються клітинки, які зарезервовані для поправок ΔZ ;

– вказується клітинка таблиці, в якій обчислюється $\sum p_i r_i$, та умова «=0»;

– знімається позначка, що змінні можуть бути тільки додатними.

Оптимізація цільової функції $F=[pr^2]=\min$ методом квадратичного програмування за умови $[pr]=0$ показує, що спостерігається баланс площ настипу та виїмки – $S_n = S_b = 68,91 \text{ м}^2$.

З метою забезпечення допустимих значень проектних ухилів

$$|u_j| \leq u_{\text{гр.}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (21)$$

складаються додаткові лінійні нерівності

$$\left| \frac{Z_{j,k} - Z_{j,0}}{D_j} \right| - u_{\text{гр.}} \leq 0, \quad (22)$$

де $u_{\text{гр.}}$ – граничне значення проектного ухилу.

Після перетворення (22) одержимо параметричну форму нерівності у вигляді:

$$\Delta_{j,0} - \Delta_{j,k} + D_j \cdot (|u_j| - u_{\text{гр.}}) \leq 0, \quad (23)$$

де $\Delta_{j,0}$ та $\Delta_{j,k}$ – поправки до наближених значень проектних позначок початкової та кінцевої точок (j) ділянки з проектним ухилом u_j ; D_j – довжина (j) ділянки.

Параметричні нерівності для ухилів додаються до обмежень в параметрах пошуку рішення.

Висновки.

Автоматизація процесу проектування повздожнього профілю лінійних споруд дає можливість пошуку оптимальних рішень аналітичними методами найменших квадратів та квадратичного програмування за різними критеріями.

Незалежно від обраних критеріїв оптимізації процедура аналітичного проектування починається з аналізу фактичного профілю, побудови тренду рельєфу та складання параметричних рівнянь для робочих позначок, що спрощує алгоритм оптимізації і розробку комп'ютерної програми.

В роботі запропоновані уніфіковані для МНК та МКП способи визначення коефіцієнтів параметричних рівнянь, встановлення вагових коефіцієнтів та



оцінки балансу земляних робіт, а також параметрична форма нерівності для граничного значення проектного ухилу.

Результати роботи можуть використовуватися для підвищення якості та оптимізації проектних рішень повздожнього профілю лінійних споруд.

Література:

1. Баран П.І. Інженерна геодезія : Монографія / П.І. Баран – Київ: ПАТ «ВІПОЛ», 2012. 618 с.
2. Баран П.І., Марущак М.П. Оптимальні методи визначення положення проектних ліній на профілі лінійних споруд / П.І. Баран, М.П. Марущак // Вісник геодезії та картографії, 2010, № 5 (68). С. 14-18.
3. Болотин А.И. Выравнивание профиля с обеспечением нулевого баланса и минимума площадей выемок и насыпей / А.И. Болотин // Геодезия и фотограмметрия при мелиоративном строительстве: межвуз. науч.-темат. сб. Новочеркасск: НИМИ, 1981. С. 40-45.
4. Коробочкин М.И. Алгоритмы и программы оптимального проектирования вертикальной планировки на ЭВМ / М.И. Коробочкин // М.: МИИЗ, 1973. 107 с.
5. Войтенко С.П. Математична обробка геодезичних вимірів. Метод найменших квадратів: Навчальний посібник. / С.П. Войтенко – К.: КНУБА, 2005. – 236 с.
6. Гончаренко Я.В. Математичне програмування. / Я.В. Гончаренко – К.: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2010. – 184 с.

Abstract: The article considers the analytical methods used to optimize the linear structure design profile taking into which utilizes the main criteria of optimality (minimization of working marks, balance and minimum earthwork, and the limit value of the design slope). There has been considered the analytical design applying the methods of least squares and quadratic programming. The authors developed and offered the methodology that can be used to balance the design marks of profile inflection points, taking into consideration the weighting factors of the working marks influence the balance of earthworks. The quadratic programming method has been proven to be efficient and offered to be used when it is necessary to take into account additional optimization conditions regarding the sum of working marks and the marginal slope. The examples of how the longitudinal profile of a road section is analytically designed are introduced.

Key words: linear structure, longitudinal profile, working mark, optimality criteria, least squares method, quadratic programming method.



UDC 624.012

DESIGN AND CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Hud M.I.*c.t.s., as.prof.*

ORCID: 0000-0001-8793-3193

Meshcheryakova O.M.*senior lecturer*

ORCID: 0000-0003-1563-9870

Kachor A.V.*Student gr. MBm-61**Ternopil Ivan Puluj National Technical University,**Ternopil, Ruska, 56, 46001***Hud V.I.***Post graduate student.**Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University,**Ternopil, Maxyma Kryvonosa, 2, 46027*

Abstract. *The article explores the essential principles and methodologies involved in the design and calculation of reinforced concrete structures. Reinforced concrete has become a fundamental material in contemporary construction due to its versatility, durability, and ability to withstand various environmental conditions. This article aims to provide a comprehensive overview of the key aspects involved in the design process, encompassing structural analysis, material considerations, and safety factors.*

The discussion begins with an examination of the fundamental properties of concrete and reinforcement materials, highlighting their interplay in achieving optimal structural performance. Subsequently, the article delves into the principles of structural analysis, addressing the importance of understanding load distribution, moment-resisting systems, and other critical factors that influence the design process. Practical examples and case studies are incorporated to illustrate the application of these concepts in real-world scenarios. Furthermore, the article emphasizes the significance of complying with relevant design codes and standards, ensuring that the resulting structures meet safety requirements and industry regulations. Special attention is given to the various limit states, including serviceability and ultimate limit states, guiding engineers in the development of robust and resilient designs.

In addition, the article discusses the role of computer-aided design (CAD) and finite element analysis (FEA) tools in enhancing the efficiency and accuracy of the design process. These technological advancements empower engineers to simulate complex structural behaviors, optimize designs, and assess the performance of reinforced concrete structures under different loading conditions. The integration of sustainability considerations in reinforced concrete design is also explored, underscoring the importance of eco-friendly practices and materials to minimize the environmental impact of construction projects.

In conclusion, this article serves as a valuable resource for engineers, architects, and construction professionals involved in the design and calculation of reinforced concrete structures. By providing a comprehensive understanding of the principles, methodologies, and technological tools involved in the design process, the article aims to contribute to the development of safe, efficient, and sustainable structures in the field of civil engineering.

Key words: *concrete, precast concrete, monolith concrete, reinforced concrete, finite element analysis, computer-aided design.*



Introduction.

Reinforced concrete, with its unique combination of strength, durability, and versatility, stands as the backbone of modern construction. As populations burgeon and urban landscapes evolve, the demand for innovative and structurally sound solutions becomes increasingly paramount. In response to this imperative, the article titled "Design and Calculation of Reinforced Concrete Structures" embarks on a journey to unravel the intricate processes involved in creating robust and resilient structures.

This article serves as a comprehensive guide, delving into the fundamental principles that govern the design of reinforced concrete structures. From understanding the properties of concrete and reinforcement materials to navigating the intricacies of structural analysis, the narrative unfolds with the aim of providing engineers, architects, and construction professionals with a holistic understanding of the design process.

Moreover, the article explores the critical role played by technology in advancing the field. Computer-aided design (CAD) and finite element analysis (FEA) tools have revolutionized the way structures are conceptualized and optimized, offering engineers unprecedented insights into the behavior of reinforced concrete under varying conditions.

As sustainability becomes an increasingly integral consideration in the realm of construction, this article also investigates the incorporation of eco-friendly practices and materials in reinforced concrete design. By aligning structural innovation with environmental responsibility, the article seeks to contribute to the development of not only safer and more efficient structures but also a more sustainable future for the built environment.

In the subsequent sections, we delve into the essential components of reinforced concrete design, exploring the intricacies of structural analysis, material considerations, compliance with industry standards, and the integration of cutting-edge technologies. Through a synthesis of theoretical insights and practical examples, this article endeavors to empower professionals with the knowledge and tools necessary to navigate the evolving landscape of reinforced concrete construction.

Main text

One of the pioneers of the introduction of reinforced concrete in Ukraine was engineer S. Rudnytskyi, who worked in Odesa. Between 1889 and 1907, his construction office built about 100 reinforced concrete tanks on the railroad tracks, used reinforced concrete in the structures of the Bessarabian Market in Kyiv, the stearin factory, and some residential and commercial buildings in Odesa.

In 1894, on the initiative of M. Tullier, a reinforced concrete bridge-arch with a span of 11.05 m was built in the courtyard of the Higher Polytechnic School as an exhibit for an exhibition held in Lviv at the time.

At the beginning of the nineteenth century, engineers of zemstvos, railroads, university professors, especially professors S. Prokofiev, Y. V. Stolyarov, E. Paton, engineers Y. Uspensky, N. Pyatnytsky, A. Ginzburg, V. Leontovych, N. Letunovsky, I. Kyrilenko, S. Vislotsky, and many others.

In 1901, for the first time in Ukraine, concrete bored piles were used to construct



the foundations of St. Nicholas Church in Kyiv.

The American Concrete Institute, contains the following basic definitions [1]:

Concrete is a mixture of portland cement or any other hydraulic cement, fine aggregate, coarse aggregate, and water, with or without admixtures.

Concrete can be classified as composite material and that is a combination of different components which improve their performance properties. In general case binder component which can be in hard crystalline or amorphous state is considered as the matrix of composite material. In concrete matrix phase the grains of aggregates (dispersed phase) are uniformly distributed.

The largest building with a full reinforced concrete frame was a six-story commercial bank in Kharkiv (1913, architects A. Rzepyshevsky and N. Vasyliiev). The building is a frame building with a specially designed brickwork infill.

The spread of reinforced concrete structures made it possible to use them in industrial construction. These include bunkers, silos, re-servoirs and water towers in Kerch, Yekaterinoslav, Mykolaiv, Khartsyzsk, Yalta, Odesa, etc.

In Ukraine, the most prominent engineering structure made of monolithic reinforced concrete is the lighthouse in Mykolaiv. It is the world's first structure of this type. In 1903, engineer N. K. Pyatnitsky and architect A. A. Baryshnikov designed the lighthouse in three versions (metal, brick, and reinforced concrete). A feasibility analysis revealed the advantages of the reinforced concrete version. The lighthouse structure is a cone-shaped tube 36 meters high with a wall thickness of 29 cm. The authors dedicated this work to their teacher, the famous scientist F. S. Yasinsky. N. A. Belelyubsky participated in the development of the project.

The feasibility of using precast concrete was recognized as early as 1902. Thus, engineer N. K. Pyatnytskyi wrote that the shortcomings of monolithic reinforced concrete made it necessary to create a floor that could be laid in finished form on the site. And in such a way that the molds for its manufacture could be used several times.

Among the first precast concrete elements were slabs, stairs, pipes, piles, and elements of reinforced concrete bridges.

Admixture is a material other than hydraulic cement, aggregate, or water, used as an ingredient of concrete and added to concrete before or during its mixing to modify its properties. In this section, unless indicated otherwise, these definitions apply to the terms concrete and admixture [4].

Precast concrete structures are the most common in modern construction. Their main advantages are high industrialization and the possibility of significant use of cheap local building materials. It is advisable to use such structures [2,7,4,8] in:

1) residential and civil buildings (large-panel and bulk-block multi-storey residential buildings, frame-panel general-purpose buildings, elements of floors, roofs, stairs, foundations, etc;)

2) industrial buildings (truss beams with a span of up to 18 m, trusses with a span of 18 and 24 m, crane beams with a span of 6 and 12 m, roofs of multi-storey buildings with a grid of 6x6, 6x9 and 6x12 m columns, shells, foundation beams, foundations, piles, etc;)

3) agricultural buildings (columns, frames, beams, slabs, arches, wall panels,



vineyard posts, etc;)

4) in engineering structures (road and railroad bridges-overpasses, transport galleries, pipes, retaining walls, re-tanks, bunkers, elevators, power line poles, etc;)

5) hydrotechnical and marine structures (buildings of thermal, nuclear and hydroelectric power plants, dam slopes, quays and piers, coastal protection devices, etc.)

Monolithic reinforced concrete structures have some positive qualities compared to prefabricated ones: no joints, indistinguishability of structures, higher rigidity and monolithicity, which reduce material consumption and increase seismic resistance. However, their use is economically viable only in the following cases:

1) when it is possible to use reusable sliding or sliding formwork;

2) during the construction of facilities where the use of unified prefabricated elements is impossible;

3) when concreting structures at the construction site does not slow down the pace of construction and does not hinder other works at the same time.

In recent years, monolithic reinforced concrete structures have become increasingly used, they are successfully used in the construction of residential and general purpose buildings, as well as elevators that are built in sliding formwork (or interchangeable), in hydraulic and marine construction, etc. Sometimes it is advisable to use precast concrete structures, which practically do not require formwork (it is performed by prefabricated parts of the structure) and are characterized by simplicity and low metal consumption of joints [7].

The structure of concrete is highly heterogeneous; it consists of a simple cement stone lattice filled with grains of sand and gravel containing a large number of micropores and capillaries.

In a compressed concrete specimen, stresses are concentrated on the stiffer particles, so a force tends to break the bond between the particles along the connection planes. At the same time, compressive and tensile stresses are concentrated near the pores. And since there are many grains in concrete, tensile stresses overlap. As a result, concrete with poor tensile strength is destroyed by tearing in the transverse direction.

The absence of regularity in the arrangement of particles of hardened concrete, as well as in the location and size of the specimens leads to a scattering of strength indicators when testing specimens from the same concrete. Concrete strength increases over time as concrete hardens over years.

Typically, after concrete reaches the age of 28 days, the increase in strength over time is not significant. Therefore, concrete is tested for compressive strength after 28 days, or the test results are adjusted to the 28-day results by multiplying the strength values by the correction factors obtained during comparative tests.

The strength of concrete depends on the shape and size of the specimens. In Ukraine, a concrete cube with a side of 15 cm is accepted as a normal specimen; with a decrease in the size of the cube, the strength increases, with an increase - decreases, since the probability of defects increases with large sizes. The conversion factors to a normal cube with a side of 15 cm are as follows: from a cube with a side of 10 cm - 0.91, from a cube with a side of 20 cm - 1.12.



As the height of the specimen increases, the compressive strength of concrete decreases, but at $3 < h/a \leq 8$ (where h is the height of the prism, and a is the side of its base), the strength of the prisms practically becomes constant.

In the United States, a cylinder with a diameter of 15.2 cm and a height of 30.5 cm is considered a normal specimen. The tensile strength of a cylindrical specimen is 0.7-0.75 of the tensile strength of a normal cube [2].

The concrete class, or cubic strength, is a conditional indicator, since the friction between the supporting faces of the specimen and the press plates causes a complex stress state in the specimen. A better idea of the uniaxial compression strength of concrete is provided by testing prisms with a height 3-4 times higher than the side of the base, since the influence of friction is negligible in the middle part of the prism.

The strength of concrete prisms (prism strength) can be determined by the cubic strength, since there is a fairly stable relationship between these characteristics: for heavy concretes, concretes with porous aggregates and porous but not less than 0.72C [2]:

$$f_{ck,prism} = (0.77 - 0.001 C) C. \quad (1)$$

The prismatic strength of concrete is used in the calculation of bending and compression of structural elements (beams, columns, compressed elements of trusses, arches, etc.).

In the case of a clean cut, which is rare in practice, the tensile strength is determined by the empirical formula [3,5]

$$f_{cw} = 0,7 \sqrt{f_{ck} f_{ctk,0.05}} \text{ or } f_{cw} = 2 f_{ctk,0.05}. \quad (2)$$

Reinforcement of reinforced concrete structures consists of working reinforcement (rods, wires, ropes), which are placed according to the acting forces, and structural and installation reinforcement to combine working reinforcement into reinforcing meshes or cages.

In this case, working reinforcement is divided into reinforcement for reinforcing conventional reinforced concrete structures and reinforcement for reinforcing prestressed concrete structures.

The results of many experiments on bending elements up to fracture revealed the dependence of the stress-strain state (SSS) of these elements on the size of the load. In the case of a steady increase in load, three stages of stress deformation can be distinguished [8].

Stage I. At low loads (bending elements), the stresses in concrete and reinforcement are small, and predominantly elastic deformations develop in concrete. The relationship between stresses and deformations is almost linear, and the stress diagrams in both the compressed and tensile zones can be considered triangular

Stage II. With a further increase in load, cracks appear in the concrete of the tensile zone, which increase up to the neutral axis; in places where cracks have formed, the concrete is excluded from operation and only the reinforcement perceives tensile stress. In the compressed zone, the stress curve in concrete becomes curved.

Stage III. In the case of further load increase, cracks in the tensile zone open, stresses in the materials increase, and the bearing capacity is exhausted (beam failure). At this stage, inelastic deformations cover a significant portion of the



compressed zone, and the stress curve in concrete has a distinctly curved-linear shape. The criteria for the exhaustion of the bearing capacity are based on the occurrence of one of three cases. The first is the achievement of the ultimate deformation of the concrete in the compressed zone ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$), the second is the rupture of the tensile reinforcement ($\varepsilon_s = \varepsilon_{ud}$) and the third is the loss of deformation resistance [7,8].

A structure may lose its required performance for one of two reasons [8]:

- 1) due to the exhaustion of the bearing capacity (destruction of the material in the most stressed sections, loss of stability of some elements or the entire structure);
- 2) due to large deformations (deflections, vibrations, settling), as well as due to the formation of cracks or their large opening.

In accordance with these two reasons, which can lead to the loss of performance of structures, two groups of their design limit stages are established:

- 1) by loss of bearing capacity;
- 2) unsuitability for normal operation.

The basic calculation complexes based on the finite element method and allowing to perform calculations of reinforced concrete structures are LIRA, Revit, Tekla. All of them have the ability to create three-dimensional models, calculate the parameters of structures and produce the necessary documentation.

Summary and conclusions.

The article on the "Design and Calculation of Reinforced Concrete Structures" has provided a comprehensive exploration of the fundamental principles, methodologies, and technological advancements involved in creating robust and sustainable structures. It commenced with an overview of the essential properties of concrete and reinforcement materials, emphasizing their collaborative role in achieving optimal structural performance.

The discussion extended to the intricacies of structural analysis, covering crucial aspects such as load distribution, moment-resisting systems, and the application of various limit states. Practical examples and case studies were integrated to illustrate the practical application of these principles in real-world scenarios.

The article highlighted the importance of compliance with industry codes and standards, ensuring that the resulting structures meet safety requirements and adhere to regulatory guidelines. Special attention was given to the incorporation of sustainability considerations, emphasizing the need for eco-friendly practices and materials to minimize the environmental impact of construction projects.

Furthermore, the role of technology, specifically computer-aided design (CAD) and finite element analysis (FEA) tools, was explored. These tools were shown to enhance the efficiency and accuracy of the design process, enabling engineers to simulate complex structural behaviors, optimize designs, and assess performance under various loading conditions.

In conclusion, the article underscores the vital role of reinforced concrete in contemporary construction and provides a roadmap for engineers, architects, and construction professionals involved in the design and calculation of structures. The integration of theoretical insights with practical examples equips professionals with the knowledge necessary to create structures that not only meet safety standards but



also contribute to a more sustainable built environment. The emphasis on compliance with industry standards and the incorporation of cutting-edge technologies reflects a commitment to ensuring that reinforced concrete structures are not only durable but also adaptable to evolving challenges. As the construction industry continues to evolve, this article serves as a valuable resource, fostering a deeper understanding of the intricacies involved in the design and calculation of reinforced concrete structures, ultimately contributing to the advancement of engineering practices and the development of safer, more efficient, and sustainable structures.

References:

1. Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318
2. DBN B.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 75 s.
3. DBN B.2.1-10-2009. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia. – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 59 s.
4. Belenia E. Y. Predvartelno napriazhennyye metallicheskiye lystovyye konstruktsyy / E. Y. Belenia, S. M. Astraia, E. B. Ramazanov. – M.: Stroiyzdat, 1979. – 192 s.
5. DSTU B B.2.6.-156: 2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia. – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 123 s.
6. Klymenko V. Z. Konstruktsii z dereva i plastmas : [pidruch.] / V. Z. Klymenko. – K.: Vyshcha shkola, 2000. – 304s.
7. Holyshev A. B. Teoriia zalizobetonu na eksperymentalnii osnovi / A.B. Holyshev, P. I. Kryvosheiev, A. M. Bambura; pid red. A. B. Holysheva. – K.: Nama prynt, 2009. – 397 c.
8. Murashko L. A., Kinash P. I., Levchych B. B. Rozrakhunok mitsnosti zalizobetonnykh zghynalnykh elementiv za zakordonnyu normamy: Navch. pos. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoho universytetu «Lvivska politekhnik», 1999. – 236 c.
9. Ігнат'єва, В. Б., & Гудь, М. І. (2021). Особливості роботи профільних виробів з композиційних матеріалів у будівельних конструкціях, розташованих в сейсмічних районах. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, (20), 19-25.

*Scientific adviser: Candidate of Technical Sciences,
associate professor. Hud M.I.
sent: 24.12.2023 © Hud M.I.*

**CONTENTS****Mechanical engineering and machinery**

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-035> 3

ALGORITHMS FOR CONTROL OF TOWER CRANE STABILITY
IN CONDITIONS OF AIR SHOCK WAVES

*Gorbatyuk Ie.V., Terentyev O.O.
Rashkivskiy V.P., Bulavka O.O.*

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-038> 10

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE CONTROL SYSTEM
OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

Ashhepkova N.S., Koshevoy N.D.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-039> 19

KINEMATIC ANALYSIS OF THE MANIPULATOR

Ashhepkova N.S., Opshitosh N.O.

Telecommunication

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-022> 30

ANALYSIS OF PHOTO DETECTORS USED IN SENSOR NETWORKS

Irkha V.I., Markolenko P.Yu.

Electrical engineering. Electronics. Nuclear engineering

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-006> 38

OVERVIEW OF HYDROGEN APPLICATION, PRODUCTION,
STORAGE AND DISTRIBUTION IN THE CONTEXT OF
UKRAINE

Himaieva K., Zhuravska N.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-013> 56

STUDY OF THE POSSIBILITY OF CONVERTING A STEAM BOILER
INTO WATER HEATING MODE WITHOUT REDUCING ITS
OPERATIONAL RELIABILITY

Hlushchenko O.L., Kaistrya R.A.

Animal products. Cereals and grain. Milling industry

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-003> 63

TECHNOLOGY OF MANUFACTURING GLUTEN-FREE BREAD
USING SPONTANEOUSLY FERMENTED YOURDERS

Berbets T.M., Dzhoha O.V.



<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-021> 71

EXCHANGE OF PROTEINS AND NUCLEIC ACIDS IN THE
TISSUES OF CHICKENS IN CONNECTION WITH AGE
AND PHYSIOLOGICAL STATE OF THE BODY

Prylipko T.M., Koval T.V.

Industrial engineering. Management engineering

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-004> 78

SIMULATION OF THE PROCESS OF CREATING A SOCIAL
NETWORK

Kravchenko S.M., Levkivskyi V. L.

Marchuk D.K., Alieksieiev B.O.

Building construction

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-020> 90

ANALYTICAL DESIGN OF THE LINEAR STRUCTURE PROFILE

Radov S.G., Kuznetsova O. V.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit30-00-044> 98

DESIGN AND CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE
STRUCTURES

Hud M.I., Meshcheryakova O.M.

Kachor A.V., Hud V.I.



International periodic scientific journal

MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Heutiges Ingenieurwesen und
innovative Technologien

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
high impact factor (ICV: 84.86)

Issue №30
Part 1
December 2023

Development of the original layout - Sergeieva&Co

Signed: December 30, 2023

Sergeieva&Co
Lußstr. 13
76227 Karlsruhe
e-mail: editor@modern techno.de
site: www.modern techno.de

Articles published in the author's edition





www.moderntechno.de

e-mail: editor@moderntechno.de