

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на  
правах рукопису

САФТЮК ЯРОСЛАВ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 62–634,2:665,75–047,36(043,3)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ  
СУМІШЕВОГО ПАЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

13 Механічна інженерія

133 Галузеве машинобудування

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

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

 Ярослав САФТЮК

Науковий керівник:

ШТУЦЬ Андрій Анатолійович,  
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Сафтюк Я.В.* Обґрунтування параметрів системи моніторингу якості сумішевого палива для дизельних двигунів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 Механічна інженерія) – Вінницький національний аграрний університет, Міністерство освіти і науки України, Вінниця, 2026.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню параметрів системи моніторингу якості сумішевого палива для дизельних двигунів. Якість такого палива залежить від властивостей і співвідношення вихідних компонентів, умов зберігання та наявності домішок. Зміни складу й температури палива впливають на роботу паливної апаратури дизельного двигуна та формування вихідного сигналу системи моніторингу. Це визначає необхідність розроблення системи моніторингу якості сумішевого палива, яка враховує вплив частки біопалива, домішок і температури на вихідний сигнал та забезпечує контроль стану палива під час його використання.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні конструктивних параметрів та умов застосування системи моніторингу якості сумішевого палива для дизельних двигунів за зміною його діелектричних властивостей з урахуванням впливу компонентного складу й температури.

Об'єкт дослідження – процес контролю якості сумішевого палива за зміною його діелектричних властивостей у системі живлення дизельного двигуна.

Предмет дослідження – закономірності формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива залежно від компонентного складу, температури та геометричних параметрів датчика діелектричної проникності з урахуванням впливу домішок.

Теоретичні дослідження ґрунтуються на математичних моделях електричних властивостей сумішевого палива, положеннях електростатики,

теорії електричних кіл і гідродинаміки. Аналітичні розрахунки та чисельне моделювання застосовано для опису формування вихідного сигналу системи моніторингу, обґрунтування геометричних параметрів датчика й оцінювання його гідравлічного опору.

Експериментальні дослідження проведено на лабораторному стенді із замкненим контуром циркуляції палива відповідно до повного факторного плану експерименту. Одержані результати опрацьовано із застосуванням методів математичної статистики та регресійного аналізу.

У програмному середовищі COMSOL Multiphysics змодельовано електричне поле між електродами датчика, а в програмному пакеті Elmer FEM – рух палива та втрати тиску. Програмне забезпечення ParaView використано для візуалізації полів швидкості й тиску палива у проточній частині датчика. Програму зчитування, усереднення та індикації сигналу розроблено в інтегрованому середовищі розроблення Arduino IDE. Табличний процесор Microsoft Excel застосовано для систематизації експериментальних даних і виконання розрахунків, а програмний пакет OriginPro – для побудови графічних залежностей і поверхонь відгуку з контурними проєкціями.

**У першому розділі** проаналізовано властивості сумішей дизельного палива нафтового походження та біопалива, чинники погіршення їхньої якості й вплив на роботу паливної апаратури дизельного двигуна. Проведено порівняльний аналіз методів контролю якості палива, конструкцій датчиків і систем моніторингу, узагальнено результати аналітичних та експериментальних досліджень. За результатами аналізу обґрунтовано доцільність моніторингу змін електричних властивостей палива безпосередньо в паливній магістралі з урахуванням частки біопалива й температури. Показано, що кількісне оцінювання вмісту води потребує окремого градуювання для заданого складу палива. Визначено вимоги до системи моніторингу та обґрунтовано напрям її вдосконалення на основі плоскопаралельного датчика у проточному корпусі, геометричні параметри якого необхідно обирати з урахуванням чутливості, повторюваності показів і гідравлічного опору.

**У другому розділі розроблено** математичну модель формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива з урахуванням частки біопалива, температури, впливу домішок, геометричних параметрів датчика діелектричної проникності та характеристик вимірювального каналу системи моніторингу якості сумішевого палива. Запропоновано оцінювати стан палива за відхиленням поточного сигналу від базового значення для відповідного компонентного складу, температури й геометрії датчика. Показано, що один вимірювальний канал характеризує інтегральний вплив домішок і не забезпечує їх одночасного роздільного визначення. Порівняно конструктивні варіанти датчика із площами електродів 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup> за відстані між ними 3 мм. За відносної діелектричної проникності палива 2,20 розрахункова ємність ідеалізованого датчика становить відповідно 0,325; 0,649 і 0,974 пФ. За результатами чисельного моделювання встановлено, що зі збільшенням площі електродів від 0,5 до 1,5 см<sup>2</sup> коефіцієнт просторової варіації модуля напруженості електричного поля зменшується від 6,94 до 5,59 %, що характеризує підвищення його однорідності в досліджуваному перерізі. Наведено залежності для оцінювання швидкості руху палива та втрат тиску. Обґрунтовано подання вихідного сигналу в умовних одиницях і визначено підходи до його усереднення.

**У третьому розділі розроблено** програму та методику експериментальних досліджень системи моніторингу якості сумішевого палива. Створено лабораторний стенд із замкненим контуром циркуляції палива та виготовлено дослідний зразок системи, який поєднує датчик діелектричної проникності й електронний блок зчитування, оброблення та індикації сигналу. Сформовано повний трифакторний план експерименту з варіюванням об'ємної частки біопалива на рівнях 0, 50 і 100 %, температури палива – 10, 20 і 30 °С та площі електродів – 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup> за сталої відстані між ними 3 мм. Визначено умови проведення досліджень за незмінних налаштувань вимірювального каналу. Розроблено порядок приготування паливних проб, стабілізації температури та реєстрації повторних відліків. Наведено методику

статистичного опрацювання результатів, побудови квадратичної регресійної моделі й оцінювання її відповідності експериментальним даним. Передбачено нормування вихідного сигналу в шкалі 1–100 умовних одиниць за спільними опорними значеннями зі збереженням первинних відліків. Розроблено алгоритм зчитування, усереднення та порогової індикації сигналу. Для оцінювання інформативності передбачено окремі серії з п'яти повторних вимірювань для кожного складу палива за температури 20 °C та площі електродів 1,0 см<sup>2</sup>.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень впливу частки біопалива, температури та площі електродів датчика діелектричної проникності на вихідний сигнал системи моніторингу. Установлено, що характер впливу кожного фактора залежить від рівнів двох інших, що зумовлює необхідність їх спільного врахування під час оцінювання стану палива. За температури 20 °C, площі електродів 1,0 см<sup>2</sup> та відстані між ними 3 мм середня чутливість вихідного сигналу в інтервалах частки біопалива 0–50 % і 50–100 % становить відповідно 0,1981 та 0,0465 умовних одиниць/%. У другому інтервалі вона приблизно у 4,26 раза менша, що характеризує нерівномірність зміни сигналу зі збільшенням частки біопалива. За окремими повторними та часовою серіями мінімальний запас розрізнення середніх сигналів досліджених складів палива становить 4,81, максимальне відносне відхилення від початкового показу протягом 10 хв – 2,36 %, а найбільший коефіцієнт варіації повторних показів – 0,93 %. За сукупністю електричних, конструктивних і гідравлічних характеристик обґрунтовано вибір площі електродів датчика діелектричної проникності 1,0 см<sup>2</sup> за відстані між ними 3 мм. Виконано аналітичне та чисельне оцінювання руху палива й втрат тиску. За витрати 5,2 л/год, прийнятої як розрахунковий орієнтир споживання палива двигуном трактора «Булат 244» за повного навантаження, аналітична оцінка перепаду тиску становить 6,90 Па, інтерполяційна оцінка за результатами чисельного моделювання – 8,07 Па, а розрахункова тривалість заміщення активного об'єму палива – 0,208 с. На мінітракторі «Булат 244» із дизельним двигуном КМ385ВТ перевірено можливість установлення датчика

діелектричної проникності у ділянці низького тиску між паливним фільтром і паливним насосом високого тиску, а також підключення електронного блока. Проведено планове економічне оцінювання виготовлення датчика діелектричної проникності й комплекту системи: для партії з 10 виробів витрати становлять відповідно 1000 та 2017,50 грн на одиницю. Визначено вплив обсягу виготовлення на питомі витрати. Для комплекту з партії 10 виробів з урахуванням установа загальні планові витрати становлять 2167,50–2317,50 грн.. Побудовано квадратичну регресійну модель та поверхні відгуку, які відображають установлені залежності. Коефіцієнт детермінації моделі становить  $R^2 = 0,8489$ , середньоквадратична похибка – 3,91 ум. од., максимальне абсолютне відхилення – 8,20 ум. од.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні закономірностей формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива залежно від його компонентного складу, температури та геометрії електродів датчика діелектричної проникності, що дало змогу обґрунтувати його конструктивні параметри та умови застосування в системі живлення дизельного двигуна.

### **Вперше:**

- теоретично обґрунтовано, що вихідний сигнал системи моніторингу якості сумішевого палива відображає інтегральну зміну його діелектричних властивостей під дією домішок і не забезпечує роздільного визначення вмісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок, що зумовлює необхідність спеціального градуювання для кількісного оцінювання кожної з них;

- експериментально встановлено закономірності формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива за спільного впливу частки біопалива, температури та площі електродів датчика діелектричної проникності, які полягають у взаємному впливі цих факторів і нелінійному характері залежності сигналу від компонентного складу, що вимагає їх одночасного врахування під час оцінювання стану паливної суміші.

**Удосконалено:**

– метод оцінювання якості сумішевого палива за відхиленням поточного вихідного сигналу системи моніторингу від його базового значення, визначеного для відомого компонентного складу, фактичної температури та незмінної геометрії електродів датчика діелектричної проникності, що дає змогу врахувати вплив зазначених факторів і розглядати відхилення як ознаку наявності домішок.

**Набув подальшого розвитку:**

– математичний опис формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива, який пов'язує діелектричні властивості паливної суміші з геометричними параметрами датчика діелектричної проникності та характеристиками вимірювального кола, що відкриває можливість ідентифікації виду забруднення за умови застосування додаткових вимірювальних каналів і відповідного градуювання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні системи моніторингу якості сумішевого палива, що складається з датчика діелектричної проникності та електронного блока зчитування, оброблення й індикації сигналу. Створено лабораторний стенд і методику досліджень, які визначають базові характеристики системи за різного компонентного складу палива, температури та геометрії електродів датчика діелектричної проникності.

Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з обґрунтуванням параметрів системи моніторингу якості сумішевого палива, використано в навчальному процесі Вінницького національного аграрного університету під час викладання дисципліни «Діагностування електрообладнання». Матеріали дослідження доповнюють вивчення принципів роботи датчиків, способів оброблення вимірювальних сигналів та особливостей застосування електронних систем конкретними прикладами конструктивних рішень і результатами їх експериментального дослідження.

Результати дослідження використано в діяльності ТОВ «Промавтоматика-Вінниця» для розроблення та вдосконалення датчиків, обґрунтування їхніх конструктивних параметрів і визначення умов застосування. Запропоновані підходи дають змогу пов'язати вибір конструктивних рішень із властивостями робочого середовища та вимогами до функціонування датчиків у складі технічних систем. Впровадження підтверджено актом від 22 травня 2026 року.

Науково-дослідні рекомендації та матеріали щодо моніторингу якості сумішевого палива передано товариству з обмеженою відповідальністю «СФГ Максима» для використання під час удосконалення організації експлуатації та технічного обслуговування техніки з дизельними двигунами. Передані матеріали дають основу для оцінювання стану палива з урахуванням його компонентного складу та визначення доцільності застосування системи моніторингу в умовах підприємства. Передання матеріалів підтверджено актом від 14 травня 2026 року.

Ключові слова: біодизель, біопаливо, вимірювання сірки, витрата палива, двигун внутрішнього згорання, екологічні стандарти, енергоефективність, інтелектуальний аналіз, моніторинг якості палива, нафтопродукти, паливна ефективність, паливна система, система живлення, сумішеве паливо, трактор.

## ANNOTATION

*Saftiuk Y. V. Substantiation of the Parameters of a Monitoring System for the Quality of Blended Fuel for Diesel Engines. – Qualifying scientific work submitted as a manuscript.*

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 Industrial Mechanical Engineering (13 Mechanical Engineering) – Vinnytsia National Agrarian University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2026.

The dissertation is devoted to substantiating the parameters of a blended fuel quality monitoring system for diesel engines. The quality of such fuel depends on the properties and proportions of its initial components, storage conditions and the presence of impurities. Changes in fuel composition and temperature affect the operation of diesel fuel injection equipment and the formation of the monitoring system output signal. This establishes the need to develop a blended fuel quality monitoring system that accounts for the effects of biofuel proportion, impurities and temperature on the output signal and enables fuel condition to be assessed during use.

The aim of the research is to substantiate the design parameters and conditions of application of a blended fuel quality monitoring system for diesel engines based on changes in fuel dielectric properties, taking into account the effects of fuel composition and temperature.

The object of the research is the process of monitoring blended fuel quality through changes in its dielectric properties in the fuel supply system of a diesel engine.

The subject of the research is the relationships governing the formation of the output signal of a blended fuel quality monitoring system as a function of fuel composition, temperature and the geometric parameters of the dielectric permittivity sensor, taking impurity effects into account.

The theoretical research is based on mathematical models of the electrical properties of blended fuel, electrostatics, electric-circuit theory and fluid dynamics. Analytical calculations and numerical modelling were used to describe monitoring system output signal formation, substantiate the sensor geometry and evaluate its hydraulic resistance.

Experimental research was conducted on a laboratory test rig with a closed fuel circulation loop according to a full factorial design. The results were processed using mathematical statistics and regression analysis.

The electric field between the sensor electrodes was modelled in COMSOL Multiphysics, while fuel flow and pressure losses were modelled in Elmer FEM. ParaView was used to visualise fuel velocity and pressure fields in the sensor flow passage. The signal acquisition, averaging and indication program was developed in Arduino IDE. Microsoft Excel was used to organise experimental data and perform calculations, and OriginPro was used to plot relationships and response surfaces with contour projections.

Chapter One analyses the properties of blends of petroleum diesel fuel and biofuel, the factors that degrade their quality and their effects on diesel fuel injection equipment. Fuel quality monitoring methods, sensor designs and monitoring systems are compared, and analytical and experimental research findings are summarised. The analysis substantiates the feasibility of monitoring changes in fuel electrical properties directly in the fuel line while accounting for biofuel proportion and temperature. Quantitative assessment of water content is shown to require separate calibration for a specified fuel composition. Monitoring system requirements are established, and an approach to improving the system is substantiated based on a parallel-plate sensor housed in a casing that allows fuel to pass between the electrodes. Its geometric parameters should be selected considering sensitivity, reading repeatability and hydraulic resistance.

Chapter Two develops a mathematical model of output signal formation in the blended fuel quality monitoring system, accounting for biofuel proportion, temperature, impurities, the geometric parameters of the dielectric permittivity sensor, and the characteristics of the system's measurement channel. It is proposed to assess fuel condition through the deviation of the current signal from the baseline value for the corresponding fuel composition, temperature, and sensor geometry. A single measurement channel is shown to reflect the combined influence of impurities without enabling their simultaneous separate determination. Sensor configurations with electrode areas of 0.5, 1.0, and 1.5 cm<sup>2</sup> were compared at an electrode spacing of

3 mm. At a relative fuel permittivity of 2.20, the calculated capacitance of the idealised sensor is 0.325, 0.649, and 0.974 pF, respectively. Numerical modelling shows that increasing the electrode area from 0.5 to 1.5 cm<sup>2</sup> reduces the spatial coefficient of variation of the electric field magnitude from 6.94% to 5.59%, indicating improved field uniformity within the cross-section examined. Relationships are presented for estimating fuel flow velocity and pressure losses. The use of arbitrary units for the output signal is justified, and approaches to signal averaging are defined.

Chapter Three develops the programme and methodology for experimental research on the blended fuel quality monitoring system. A laboratory test rig with a closed fuel circulation loop was constructed, and a prototype system was manufactured comprising a dielectric permittivity sensor and an electronic unit for signal acquisition, processing, and indication. A full three-factor experimental design was established, varying the biofuel volume fraction at 0, 50, and 100%, fuel temperature at 10, 20, and 30 °C, and electrode area at 0.5, 1.0, and 1.5 cm<sup>2</sup>, with a fixed electrode spacing of 3 mm. Conditions were defined for conducting the experiments with unchanged measurement-channel settings. Procedures were developed for preparing fuel samples, stabilising temperature, and recording repeated readings. Methods are presented for statistical processing of the results, fitting a quadratic regression model, and assessing its agreement with experimental data. Output signal normalisation on a scale of 1–100 arbitrary units using common reference values is provided for while retaining the raw readings. An algorithm for signal acquisition, averaging, and threshold indication was developed. To assess signal informativeness, separate series of five repeated measurements are specified for each fuel composition at a temperature of 20 °C and an electrode area of 1.0 cm<sup>2</sup>.

Chapter Four presents experimental results on the effects of biofuel proportion, temperature, and dielectric permittivity sensor electrode area on the monitoring system output signal. The effect of each factor was found to depend on the levels of the other two, requiring their joint consideration when assessing fuel condition. At a temperature of 20 °C, an electrode area of 1.0 cm<sup>2</sup>, and an electrode spacing of 3 mm, the average output signal sensitivity over the biofuel proportion ranges of 0–50% and

50–100% is 0.1981 and 0.0465 arbitrary units per percentage point, respectively. The sensitivity in the latter range is approximately 4.26 times lower, indicating a non-uniform change in the signal as the biofuel proportion increases. Based on separate repeated-reading and time-series datasets, the minimum discrimination margin between the mean signals of the investigated fuel compositions is 4.81, the maximum relative deviation from the initial reading over 10 minutes is 2.36%, and the highest coefficient of variation of repeated readings is 0.93%. Considering the combined electrical, design, and hydraulic characteristics, an electrode area of 1.0 cm<sup>2</sup> at an electrode spacing of 3 mm was substantiated for the dielectric permittivity sensor. Fuel flow and pressure losses were evaluated analytically and numerically. At a flow rate of 5.2 L/h, adopted as a calculated reference for fuel consumption by the Bulat 244 tractor engine at full load, the analytical pressure-drop estimate is 6.90 Pa, the interpolated estimate from numerical modelling is 8.07 Pa, and the calculated time required to replace the active fuel volume is 0.208 s. On a Bulat 244 compact tractor with a KM385BT diesel engine, the feasibility of installing the dielectric permittivity sensor in the low-pressure section between the fuel filter and the high-pressure fuel pump, as well as connecting the electronic unit, was verified. A planned-cost assessment was performed for manufacturing the dielectric permittivity sensor and the complete system: for a batch of 10 units, the costs are 1,000 Ukrainian hryvnias and 2,017.50 Ukrainian hryvnias per unit, respectively. The effect of production volume on unit costs was determined. For a complete system from a batch of 10 units, total planned manufacturing and installation costs are 2,167.50–2,317.50 Ukrainian hryvnias per machine. A quadratic regression model and response surfaces were constructed to represent the established relationships. The model coefficient of determination is  $R^2 = 0.8489$ , the root-mean-square error is 3.91 arbitrary units, and the maximum absolute deviation is 8.20 arbitrary units.

The scientific novelty of the results lies in establishing the relationships governing the formation of the output signal of the blended fuel quality monitoring system as a function of fuel composition, temperature, and the electrode geometry of the dielectric permittivity sensor, which made it possible to substantiate the sensor's

design parameters and the conditions for its use in the fuel supply system of a diesel engine.

**For the first time:**

- it has been theoretically substantiated that the output signal of the blended fuel quality monitoring system reflects the integral change in the dielectric properties of the fuel under the influence of impurities and does not enable separate determination of the contents of water, sulfur-containing compounds, and mechanical impurities, necessitating dedicated calibration for the quantitative assessment of each of them;

- the relationships governing the formation of the output signal of the blended fuel quality monitoring system under the combined influence of biofuel proportion, temperature, and the electrode area of the dielectric permittivity sensor have been established experimentally; these relationships involve interactions among these factors and a nonlinear dependence of the signal on fuel composition, requiring their simultaneous consideration when assessing the condition of the fuel blend.

**The following has been improved:**

- the method for assessing blended fuel quality based on the deviation of the current output signal of the monitoring system from its baseline value, determined for a known fuel composition, the actual temperature, and unchanged electrode geometry of the dielectric permittivity sensor, which allows the effects of these factors to be taken into account and the deviation to be considered an indication of the presence of impurities.

**The following has been further developed:**

- the mathematical description of output signal formation in the blended fuel quality monitoring system, which links the dielectric properties of the fuel blend to the geometric parameters of the dielectric permittivity sensor and the characteristics of the measurement circuit and electronic unit, opening up the possibility of identifying the type of contamination provided that additional measurement channels and appropriate calibration are used.

The practical significance of the results lies in the development of a blended fuel quality monitoring system comprising a dielectric permittivity sensor and an

electronic unit for signal acquisition, processing, and indication. A laboratory test rig and a research methodology were developed to determine the baseline characteristics of the system for different fuel compositions, temperatures, and sensor electrode geometries.

The theoretical and experimental research results concerning the substantiation of the parameters of the blended fuel quality monitoring system have been used in teaching the course “Diagnostics of Electrical Equipment” at Vinnytsia National Agrarian University. The research materials supplement the study of sensor operating principles, measurement signal processing methods, and the application of electronic systems with specific examples of design solutions and the results of their experimental investigation.

The research results have been used by Promavtomatyka-Vinnytsia Limited Liability Company to develop and improve sensors, substantiate their design parameters, and determine their conditions of application. The proposed approaches link the selection of design solutions to the properties of the working medium and the requirements for sensor operation within technical systems. Implementation is confirmed by the certificate dated 22 May 2026.

Research recommendations and materials concerning blended fuel quality monitoring were transferred to SFG Maksima Limited Liability Company for use in improving the organisation of the operation and maintenance of machinery equipped with diesel engines. These materials provide a basis for assessing fuel condition while accounting for fuel composition and determining the feasibility of using the monitoring system under the enterprise’s operating conditions. The transfer of the materials is confirmed by the certificate dated 14 May 2026.

Keywords: biodiesel, biofuel, sulfur measurement, fuel consumption, internal combustion engine, environmental standards, energy efficiency, intelligent analysis, fuel quality monitoring, petroleum products, fuel efficiency, fuel system, fuel supply system, blended fuel, tractor.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародних наукометричних баз даних**

1. **Сафтюк Я. В.** Сучасні рішення та розвиток основних методів і засобів вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2024. Т. 341, № 5. С. 477–484. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-341-5-69. URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/444/701>. (0,80 друк. арк.)
2. Shtuts A., **Saftiuk Y.** Intelligent systems for improving the reliability of sulfur measurement in fuels. Техніка, енергетика, транспорт АПК. № 3 (130). С. 66–73. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-8. URL: <https://tetapk.vsau.org/en/particles/intelligent-systems-for-improving-the-reliability-of-sulfur-measurement-in-fuels>. (0,63 друк. арк., особистий внесок здобувача: досліджено застосування інтелектуальних алгоритмів для підвищення достовірності визначення вмісту сірки в паливі, проаналізовано чинники, що впливають на точність результатів вимірювання, та обґрунтовано їх урахування в системі моніторингу якості сумішевого палива – 0,31 друк. арк.).
3. Штуць А. А., **Сафтюк Я. В.** Інфрачервона спектроскопія – інструмент підвищення надійності інтелектуального аналізу сірковмісних сполук нафтових палив. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2025. Т. 359, № 6.2. С. 17–21. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-359-72. URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/2316>. (0,61 друк. арк., особистий внесок здобувача: досліджено інфрачервоні ознаки сірковмісних сполук, проаналізовано вплив параметрів датчика та обґрунтовано калібрувальні моделі для підвищення надійності моніторингу якості сумішевого палива – 0,30 друк. арк.).
4. Штуць А. А., **Сафтюк Я. В.** Програма та методика експериментальних досліджень діелектричного методу експрес-контролю вмісту шкідливих

домішок у дизельному паливі. Вібрації у техніці та технологіях. 2026. № 2 (121). С. 75–81. DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-9. URL: <https://vibrojournal.vsau.org/en/particles/program-and-methodology-of-experimental-studies-of-the-dielectric-method-for-express-control-of-harmful-impurities-content-in-diesel-fuel>. (0,64 друк. арк., особистий внесок здобувача: розроблено програму експериментальних досліджень, обґрунтовано параметри лабораторного стенду, фактори експерименту та порядок оброблення даних для перевірки системи моніторингу якості палива за зміни вмісту домішок і температури – 0,32 друк. арк.).

5. Сафтюк Я. В. Вплив шкідливих домішок у паливі на ефективність роботи двигуна внутрішнього згорання. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2026. Т. 366, № 4. С. 111–117. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-367-16. URL: <https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/2712>. (0,59 друк. арк.)

6. Штуць А. А., Сафтюк Я. В. Математична модель контролю забрудненості палива за діелектричною проникністю в системах живлення дизельних двигунів. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. С. 114-121. DOI: 10.32782/1995-0519.2026.3.10 URL: [https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2026\\_3\\_114.pdf](https://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2026_3_114.pdf). (0,69 друк. арк., особистий внесок здобувача: розроблено математичну модель формування вихідного сигналу системи моніторингу, сформовано матрицю чутливості – 0,35 друк. арк.).

#### Тези і матеріали конференцій:

7. Сафтюк Я.В. Огляд сучасних методів визначення сірки в нафтопродуктах. Проблеми, пріоритети та перспективи розвитку науки, освіти і суспільства в XXI столітті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 15 червня 2024 року. Полтава, Україна, 2024. С. 55-56. URL: <https://drive.google.com/file/d/1lxfW62AiUga8j8J5GkF046Mh05RgJGQ/view> (0,14 друк. арк.).

8. **Сафтюк Я.В.** Необхідність розробки портативних експрес-засобів для вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах. *Perspectives of contemporary science: theory and practice*: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 16-18 вересня 2024 року. Львів, Україна, 2024. С. 206-209. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/09/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-16-18.09.2024.pdf> (0,17 друк. арк.).

9. **Сафтюк Я.В., Штуць А.А.** Вплив вмісту сірки в паливах на сільськогосподарські машини. *Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості*: матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 16 жовтня 2025 року. Кам'янець-Подільський, 2025. С. 230-232. URL: <https://surl.li/xjchdk> (0,08 друк. арк.).

10. **Сафтюк Я.В.** Експрес-контроль сірковмісних сполук у паливі як елемент технічного сервісу сільськогосподарської техніки. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції, 17-18 жовтня 2025 року, присвяченої 125-й річниці від дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Київ: НУБіП України, 2025. С. 515-516. URL: <https://surl.li/vubqfa> (0,11 друк. арк.).

11. **Сафтюк Я.В.** Обґрунтування структури інтеграції датчика контролю шкідливих домішок у паливну систему тракторів. *Машинобудування, агроінженерія та автомобільний транспорт: інновації і перспективи розвитку*: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції, 21 травня 2026 року. Полтава: ПДАУ, 2026. С. 122-123. URL: [https://drive.google.com/drive/folders/1T4tvZ1B3geiF\\_T7A5XE7ZHY8MTJqb62g](https://drive.google.com/drive/folders/1T4tvZ1B3geiF_T7A5XE7ZHY8MTJqb62g) (0,10 друк. арк.).

#### **Патенти та авторські свідоцтва:**

12. Гончарук І.В., Граняк В.Ф., Токарчук О.А., **Сафтюк Я.В.** Патент України на корисну модель. Вимірювальна насадка вмісту сірки в скрапленому газі. № 159188 Україна. МПК G01N21/00, G01N21/01. № u202401656; заяв. від 03.04.2024 р. опубл. 07.05.2025, бюл. № 19/2025.

## ЗМІСТ

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....                                                                    | 20  |
| ВСТУП .....                                                                                        | 21  |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СУМІШЕВОГО ПАЛИВА ТА<br>МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЇХ МОНІТОРИНГУ .....   | 29  |
| 1.1 Сумішеве паливо для дизельних двигунів та особливості його<br>застосування .....               | 29  |
| 1.2 Чинники зміни якості сумішевого палива та вимоги до його контролю .....                        | 37  |
| 1.3 Аналіз методів контролю якості сумішевого палива .....                                         | 46  |
| 1.4 Аналіз конструкцій датчиків і систем моніторингу якості палива .....                           | 54  |
| 1.5 Огляд аналітичних і експериментальних досліджень контролю якості<br>сумішевого палива .....    | 61  |
| 1.6 Обґрунтування наряду вдосконалення СМЯСП .....                                                 | 68  |
| 1.7 Висновки до розділу 1 .....                                                                    | 70  |
| РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ<br>МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СУМІШЕВОГО ПАЛИВА ..... | 72  |
| 2.1 Сумішеве паливо як багатокомпонентний об'єкт моделювання .....                                 | 74  |
| 2.2 Теоретичний опис властивостей базової паливної суміші .....                                    | 76  |
| 2.3 Теоретичне врахування води, сірковмісних сполук і механічних домішок ..                        | 78  |
| 2.4 Обґрунтування геометричних параметрів датчика .....                                            | 81  |
| 2.5 Формування вихідного сигналу та врахування температури .....                                   | 88  |
| 2.6 Обґрунтування використання умовних одиниць вимірювання вихідного<br>сигналу.....               | 92  |
| 2.7 Висновки до розділу 2 .....                                                                    | 95  |
| РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ<br>ДОСЛІДЖЕНЬ.....                                 | 97  |
| 3.1 Мета, завдання та програма досліджень СМЯСП .....                                              | 97  |
| 3.2 Конструкція ДДП та ЕБ СМЯСП .....                                                              | 98  |
| 3.3 Лабораторний стенд та умови проведення досліджень .....                                        | 104 |
| 3.4 Методика приготування лабораторних проб суміші палив.....                                      | 108 |
| 3.5 Планування та методика проведення експерименту .....                                           | 110 |
| 3.6 Методика статистичної обробки експериментальних даних.....                                     | 113 |
| 3.7 Нормування вихідного сигналу та алгоритм індикації СМЯСП .....                                 | 115 |
| 3.8 Висновки до розділу 3 .....                                                                    | 117 |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА                                |     |
| ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ                       |     |
| СУМІШЕВОГО ПАЛИВА .....                                                   | 120 |
| 4.1 Результати вимірювання вихідного сигналу СМЯСП .....                  | 120 |
| 4.2 Вплив компонентного складу палива на вихідний сигнал .....            | 128 |
| 4.3 Побудова та оцінювання регресійної моделі базового сигналу СМЯСП ...  | 132 |
| 4.4 Оцінювання інформативності, стабільності, однозначності та чутливості |     |
| вихідного сигналу .....                                                   | 140 |
| 4.5 Обґрунтування та перевірка встановлення СМЯСП у паливній системі      |     |
| трактора «Булат 244» .....                                                | 147 |
| 4.6 Планові витрати на виготовлення та встановлення СМЯСП .....           | 157 |
| 4.7 Висновки до розділу 4 .....                                           | 161 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                                                   | 164 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                          | 167 |
| Додаток А .....                                                           | 189 |
| Додаток Б .....                                                           | 190 |
| Додаток В .....                                                           | 193 |
| Додаток Г .....                                                           | 194 |
| Додаток Д .....                                                           | 195 |
| Додаток Е .....                                                           | 196 |
| Додаток Ж .....                                                           | 197 |
| Додаток И .....                                                           | 198 |
| Додаток І .....                                                           | 199 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

ДДП – датчик діелектричної проникності.

ДП – дизельне паливо.

ДСТУ – національний стандарт України.

ЕБ – електронний блок.

ІЧ – інфрачервоний.

ПНВТ – паливний насос високого тиску.

СМЯСП – система моніторингу якості сумішевого палива.

УФ – ультрафіолетовий.

CAN – мережевий інтерфейс обміну даними між контролерами.

CV – коефіцієнт варіації.

FEM – метод скінченних елементів (Finite Element Method).

FTIR – інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є.

I<sup>2</sup>C – послідовний інтерфейс обміну даними (Inter-Integrated Circuit).

IR – інфрачервоний діапазон (Infrared).

LCD – рідкокристалічний дисплей (Liquid Crystal Display).

NIR – ближній інфрачервоний діапазон (Near Infrared).

PTFE – політетрафторетилен.

RC-коло – електричне коло з резистивною та ємнісною складовими.

RMSE – середньоквадратичне відхилення прогнозу від даних.

USB – універсальна послідовна шина.

WIF – позначення виявлення води в паливі (Water in Fuel).

XRF – рентгенофлуоресцентний аналіз.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Застосування сумішевого палива на основі дизельного палива (ДП) та біопалива потребує врахування його властивостей під час підготовки, зберігання та використання в двигуні внутрішнього згоряння. Якість такого палива визначається співвідношенням і характеристиками вихідних компонентів, стабільністю суміші та наявністю небажаних домішок. Потрапляння води й механічних частинок, окиснення та накопичення продуктів старіння можуть погіршувати умови фільтрації, порушувати паливоподачу й роботу прецизійних елементів паливної апаратури. Тому своєчасне виявлення змін стану палива є важливим завданням забезпечення належних умов експлуатації дизельних двигунів.

Контроль окремих показників якості лабораторними методами дає змогу оцінювати відповідність проб палива встановленим вимогам. Водночас результати такого аналізу характеризують стан відібраної проби та не відображають подальших змін, які можуть виникати під час зберігання й використання палива. Це зумовлює потребу в системах моніторингу, придатних для встановлення в паливну магістраль і реєстрації змін властивостей палива безпосередньо перед його надходженням до паливної апаратури.

Особливістю сумішевого палива як об'єкта моніторингу є залежність його діелектричних властивостей від компонентного складу та температури. Для реєстрації змін властивостей сумішевого палива використано датчик діелектричної проникності (ДДП), включений до вимірювального каналу системи моніторингу якості сумішевого палива (СМЯСП). Вихідний сигнал СМЯСП формується шляхом реєстрації часу заряджання  $RC$ -кола, до складу якого входить ДДП, та подається в умовних одиницях. Зміна частки біопалива впливає на електричні властивості суміші й відповідний вихідний сигнал навіть за відсутності додаткового забруднення. Температурні коливання також змінюють діелектричні властивості палива, що позначається на вихідному сигналі з ДДП. Отже, оцінювання стану палива потребує встановлення базових характеристик вихідного сигналу для заданого співвідношення компонентів за відповідної температури та незмінних параметрів вимірювального каналу.

Розроблення проточної СМЯСП пов'язане з вибором конструктивних параметрів ДДП та узгодженням його характеристик з умовами роботи системи живлення дизельного двигуна. Геометричні параметри електродів ДДП впливають на величину вихідного сигналу СМЯСП, а геометрія проточної частини датчика визначає об'єм палива в ділянці контролю та гідравлічний опір. Тому обґрунтування конструкції ДДП потребує спільного дослідження формування вихідного сигналу СМЯСП та руху палива через датчик з урахуванням характеристик електронного блока й умов установлення в систему живлення дизельного двигуна.

Наукове завдання полягає у встановленні закономірностей формування вихідного сигналу СМЯСП залежно від компонентного складу палива, температури та конструктивних параметрів ДДП з урахуванням впливу домішок на діелектричні властивості палива. Поєднання математичного опису цих залежностей з експериментальними дослідженнями створює основу для обґрунтування конструктивних параметрів ДДП та умов застосування СМЯСП. Це передбачає визначення базових характеристик СМЯСП для палива заданого складу за відповідної температури та розроблення алгоритму індикації змін стану палива.

Таким чином, обґрунтування конструктивних параметрів та умов застосування СМЯСП для дизельних двигунів є актуальним науково-технічним завданням. Його розв'язання спрямоване на розроблення системи, яка забезпечує виявлення відхилень вихідного сигналу від базових значень з урахуванням компонентного складу й температури палива та придатна для встановлення в систему живлення дизельного двигуна.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у Вінницькому національному аграрному університеті в межах ініціативної науково-дослідної роботи «Дослідження шляхів оптимізації показників технологічного процесу виготовлення ефірів жирних кислот для дизельного біопалива» (номер державної реєстрації 0122U002187, 2022–2026 р.). Дослідження за темою дисертації спрямовано на

обґрунтування параметрів СМЯСП з урахуванням компонентного складу, температури та впливу шкідливих домішок.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні конструктивних параметрів та умов застосування системи моніторингу якості сумішевого палива для дизельних двигунів за зміною його діелектричних властивостей з урахуванням впливу компонентного складу й температури.

Наукова гіпотеза полягає в тому, що врахування компонентного складу й температури палива дає змогу встановити базову характеристику СМЯСП, відхилення від якої може бути ознакою зміни стану палива. Експериментальна перевірка охоплює визначення базових характеристик СМЯСП за різної частки біопалива, температури та площі електродів. Вплив домішок розглянуто в теоретичній моделі формування вихідного сигналу.

#### **Завдання дослідження:**

1. Проаналізувати властивості сумішей ДП нафтового походження та біопалива, чинники погіршення їхньої якості й вплив на роботу дизельного двигуна. На основі аналізу методів і засобів контролю якості палива сформулювати вимоги до СМЯСП.

2. Розробити математичну модель формування вихідного сигналу СМЯСП з урахуванням складу палива, температури, впливу домішок і геометричних параметрів ДДП і характеристик вимірювального каналу СМЯСП.

3. Створити лабораторний стенд і розробити методику експериментальних досліджень. Експериментально встановити вплив частки біопалива, температури та площі електродів ДДП на вихідний сигнал СМЯСП, побудувати регресійну модель базового сигналу й оцінити її узгодженість з отриманими даними. Оцінити інформативність, короткочасну стабільність, однозначність і чутливість вихідного сигналу.

4. Обґрунтувати конструктивні параметри ДДП та умови застосування СМЯСП з урахуванням чутливості й повторюваності вихідного сигналу та гідравлічного опору датчика. Перевірити можливість установа системи, її підключення та зчитування сигналу в системі живлення дизельного двигуна.

5. Визначити планові витрати на виготовлення СМЯСП та її встановлення в систему живлення дизельного двигуна.

Об'єкт дослідження – процес контролю якості сумішевого палива за зміною його діелектричних властивостей у системі живлення дизельного двигуна.

Предмет дослідження – закономірності формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива залежно від компонентного складу, температури та геометричних параметрів датчика діелектричної проникності з урахуванням впливу домішок.

Методи дослідження.

Теоретичні дослідження ґрунтуються на математичних моделях електричних властивостей сумішевого палива, положеннях електростатики, теорії електричних кіл і гідродинаміки. Аналітичні розрахунки та чисельне моделювання застосовано для опису формування вихідного сигналу СМЯСП, обґрунтування геометричних параметрів електродів і проточної частини датчика та оцінювання втрат тиску під час проходження палива через нього.

Експериментальні дослідження виконано на лабораторному стенді із замкненим контуром циркуляції палива за повним трифакторним планом експерименту. Факторами варіювання обрано об'ємну частку біопалива, температуру палива та площу електродів ДДП. Результати опрацьовано методами математичної статистики та регресійного аналізу. Методика передбачає оцінювання інформативності вихідного сигналу за попарним порівнянням середніх відгуків досліджених складів палива, середньої чутливості до зміни частки біопалива та короткочасної стабільності за часовою зміною показів за незмінних умов вимірювання.

У програмному середовищі COMSOL Multiphysics змодельовано електричне поле між електродами датчика, а в програмному пакеті Elmer FEM – рух палива та втрати тиску. Програмне забезпечення ParaView використано для візуалізації полів швидкості й тиску палива у проточній частині датчика. Програму зчитування, усереднення та індикації сигналу розроблено в інтегрованому середовищі розроблення Arduino IDE. Табличний процесор

Microsoft Excel застосовано для систематизації експериментальних даних і виконання розрахунків, а програмний пакет OriginPro – для побудови графічних залежностей і поверхонь відгуку з контурними проєкціями.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні закономірностей формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива залежно від його компонентного складу, температури та геометрії електродів датчика діелектричної проникності, що дало змогу обґрунтувати його конструктивні параметри та умови застосування в системі живлення дизельного двигуна.

### **Вперше:**

- теоретично обґрунтовано, що вихідний сигнал системи моніторингу якості сумішевого палива відображає інтегральну зміну його діелектричних властивостей під дією домішок і не забезпечує роздільного визначення вмісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок, що зумовлює необхідність спеціального градуювання для кількісного оцінювання кожної з них;

- експериментально встановлено закономірності формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива за спільного впливу частки біопалива, температури та площі електродів датчика діелектричної проникності, які полягають у взаємному впливі цих факторів і нелінійному характері залежності сигналу від компонентного складу, що вимагає їх одночасного врахування під час оцінювання стану паливної суміші.

### **Удосконалено:**

- метод оцінювання якості сумішевого палива за відхиленням поточного вихідного сигналу системи моніторингу від його базового значення, визначеного для відомого компонентного складу, фактичної температури та незмінної геометрії електродів датчика діелектричної проникності, що дає змогу врахувати вплив зазначених факторів і розглядати відхилення як ознаку наявності домішок.

### **Набув подальшого розвитку:**

- математичний опис формування вихідного сигналу системи моніторингу якості сумішевого палива, який пов'язує діелектричні властивості

паливної суміші з геометричними параметрами датчика діелектричної проникності та характеристиками вимірювального кола й електронного блока, що відкриває можливість ідентифікації виду забруднення за умови застосування додаткових вимірювальних каналів і відповідного градуювання.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає в розробленні дослідного зразка СМЯСП, що складається з ДДП та ЕБ зчитування, оброблення й індикації сигналу. Створено лабораторний стенд і методику досліджень, які визначають базові характеристики системи за різного компонентного складу палива, температури та геометрії електродів ДДП.

Розроблено алгоритм нормування сигналу СМЯСП у шкалі 1–100 ум. од. за спільними опорними значеннями. Застосування даного алгоритму забезпечує подання результатів на єдиній шкалі для порівняння відгуку СМЯСП за різних умов дослідження. Нормоване значення характеризує відносний рівень вихідного сигналу; визначення концентрації окремої домішки потребує окремої градуювальної залежності для заданого складу палива й температурних умов. Визначено планові витрати на виготовлення ДДП та комплекту СМЯСП, а також на встановлення системи на одну машину.

Можливість монтажу ДДП перевірено на мінітракторі «Булат 244» із дизельним двигуном КМ385ВТ: датчик розміщено в ділянці низького тиску паливної магістралі між паливним фільтром і паливним насосом високого тиску (ПНВТ). Перевірено підключення ЕБ СМЯСП та зчитування вихідного сигналу вимірювального каналу з ДДП. Це підтверджує монтажну придатність розробленої конструкції для зазначеної ділянки системи живлення дизельного двигуна.

Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з обґрунтуванням параметрів системи моніторингу якості сумішевого палива, використано в навчальному процесі Вінницького національного аграрного університету під час викладання дисципліни «Діагностування електрообладнання». Матеріали дослідження доповнюють вивчення принципів роботи датчиків, способів оброблення вимірювальних сигналів та особливостей застосування електронних систем конкретними

прикладами конструктивних рішень і результатами їх експериментального дослідження.

Результати дослідження використано в діяльності ТОВ «Промавтоматика-Вінниця» для розроблення та вдосконалення датчиків, обґрунтування їхніх конструктивних параметрів і визначення умов застосування. Запропоновані підходи дають змогу пов'язати вибір конструктивних рішень із властивостями робочого середовища та вимогами до функціонування датчиків у складі технічних систем. Впровадження підтверджено актом від 22 травня 2026 року (додаток Е).

Науково-дослідні рекомендації та матеріали щодо моніторингу якості сумішевого палива передано ТОВ «СФГ Максима» для використання під час удосконалення організації експлуатації та технічного обслуговування техніки з дизельними двигунами. Передані матеріали дають основу для оцінювання стану палива з урахуванням його компонентного складу та визначення доцільності застосування системи моніторингу в умовах підприємства. Передання матеріалів підтверджено актом від 14 травня 2026 року (додаток Ж).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи отримано здобувачем особисто. Праці [52, 77, 87, 88, 89, 113] виконано одноосібно, праці [70, 98, 99, 112, 125, 126] – у співавторстві.

У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: дослідження інтелектуальних алгоритмів підвищення достовірності вимірювань та аналіз чинників впливу на точність контролю показників палива [98]; аналіз можливостей інфрачервоної спектроскопії, спектральних ознак досліджуваних сполук і впливу параметрів датчика на результати вимірювань, обґрунтування калібрувальних моделей [99]; розроблення програми експериментальних досліджень, обґрунтування параметрів лабораторного стенда, вибір факторів експерименту та порядку оброблення даних [125]; розроблення математичної моделі формування вихідного сигналу СМЯСП, формування матриці чутливості та визначення умов застосування моделі [126]; обґрунтування конструкції вимірювальної насадки та розташування її вимірювальних компонентів [112]; аналіз впливу складу палива на роботу паливної апаратури й

експлуатаційні показники сільськогосподарських машин, обґрунтування необхідності контролю якості палива [70].

Постановку завдань, обговорення й узагальнення результатів досліджень здійснено спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали за тематикою дослідження оприлюднено у збірниках таких конференцій: «Проблеми, пріоритети та перспективи розвитку науки, освіти і суспільства в XXI столітті» (Полтава, 15 червня 2024 р.); VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Perspectives of contemporary science: theory and practice» (Львів, 16–18 вересня 2024 р.); I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості» (Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 р.); XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Київ, 17–18 жовтня 2025 р.); I Міжнародної науково-практичної конференції «Машинобудування, агроінженерія та автомобільний транспорт: інновації і перспективи розвитку» (Полтава, 21 травня 2026 р.).

**Публікації.** За наведеним у дисертації списком праць результати дослідження відображено в 12 опублікованих працях, серед яких 6 статей у наукових виданнях, 1 патент України на корисну модель та 5 праць у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та восьми додатків. Основний текст роботи містить 63 рисунки та 31 таблицю. Список використаних джерел налічує 154 найменування.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СУМІШЕВОГО ПАЛИВА ТА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ЇХ МОНІТОРИНГУ

#### 1.1 Сумішеве паливо для дизельних двигунів та особливості його застосування

Біопаливо є одним із видів відновлюваних паливних ресурсів, використання яких сприяє зменшенню залежності від нафтопродуктів. Сировиною для виробництва біопалива для дизельних двигунів слугують рослинні олії, зокрема ріпакова, соєва та соняшникова, а також тваринні жири й відпрацьовані харчові олії. Одержане паливо застосовують як самостійне моторне паливо або як компонент сумішей із ДП нафтового походження. Світову динаміку його виробництва за 2014–2024 рр., сформовану за даними REN21 та World Bioenergy Association, наведено на рисунку 1.1 [1, 2]. Основні види сировини для одержання біопалива та його застосування в дизельних двигунах розглянуто в працях [3, 4].

У цій роботі досліджуються суміші ДП нафтового походження та біопалива. Позначення B0 відповідає вихідному ДП, B100 – біопаливу, а B50 – суміші з об'ємною часткою біопалива 50 %.

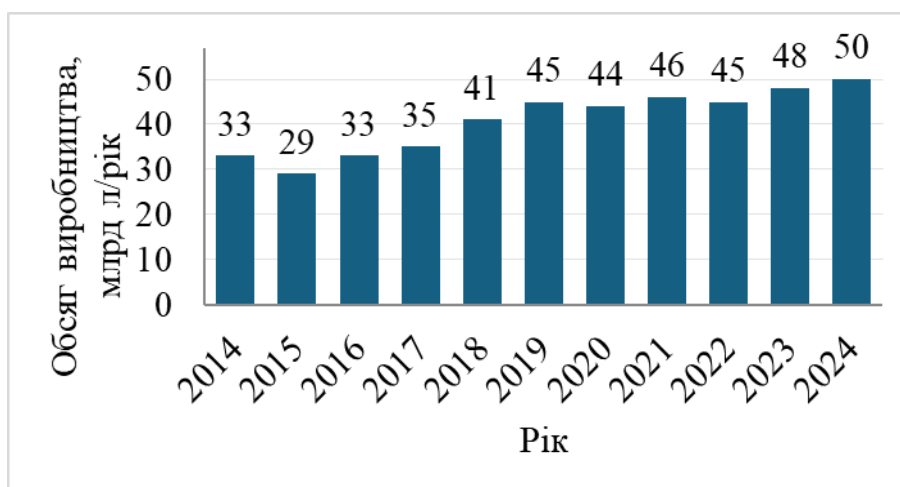


Рисунок 1.1 – Динаміка світового виробництва біопалива для дизельних двигунів у 2014–2024 роках

За наведеними джерелами світове виробництво біопалива для дизельних двигунів зросло від 33 млрд л у 2014 р. до 48 млрд л у 2023 р.; оцінка WBA за 2024 р. становить близько 50 млрд л. Показники різних статистичних джерел зіставлено як загальну тенденцію з урахуванням відмінностей обліку. Розширення застосування біопалива посилює потребу в контролі фактичного складу сумішей та збереження їхніх властивостей під час використання.

Розподіл виробництва біопалива між країнами Європейського Союзу наведено на рисунку 1.2 за даними звіту USDA FAS [5]. Біопаливо використовують як компонент сумішевого палива для дизельних двигунів.

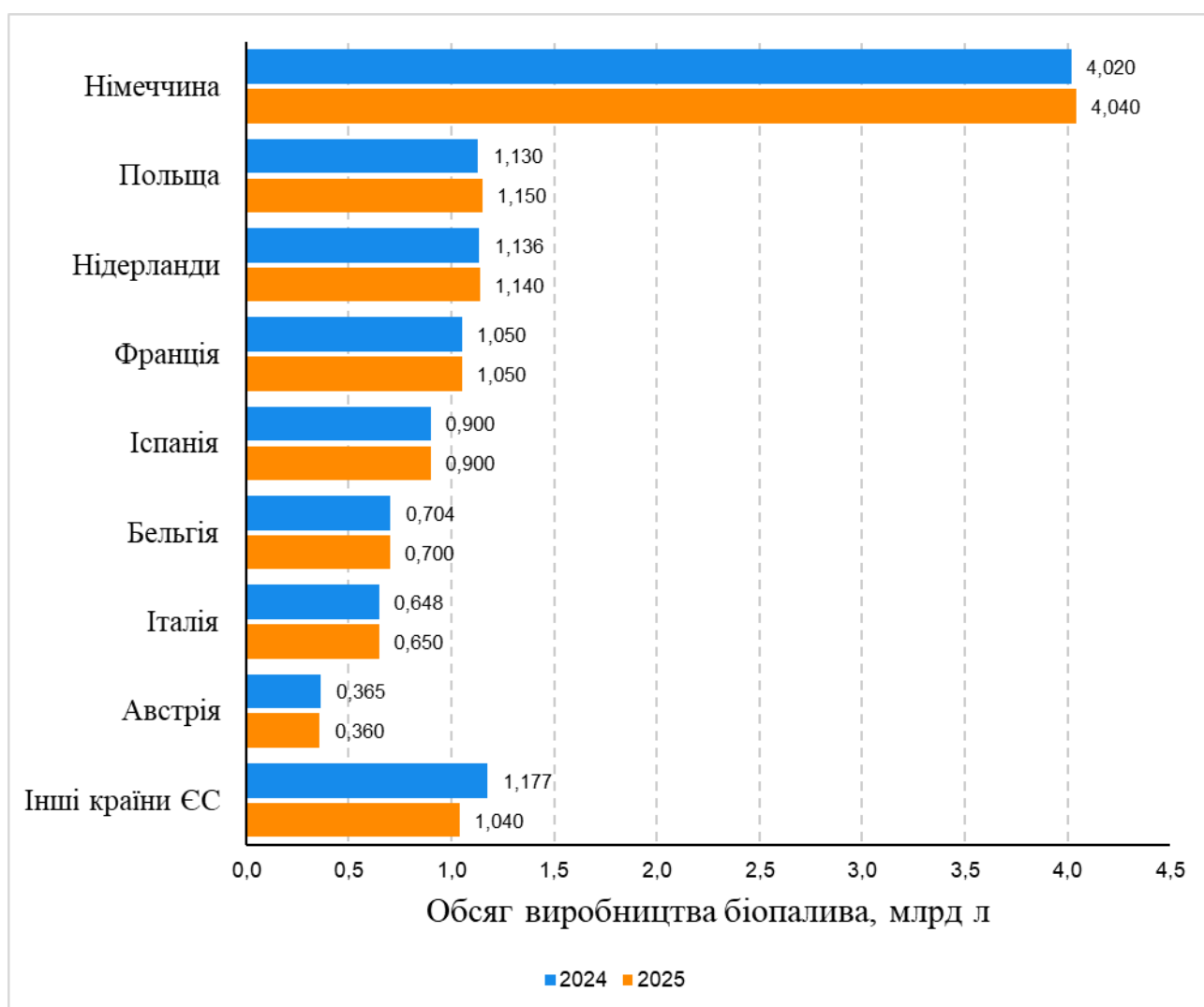


Рисунок 1.2 – Виробництво біопалива за країнами ЄС у 2024–2025 роках

Найбільші наведені обсяги припадають на Німеччину: 4,020 млрд л у 2024 р. та 4,040 млрд л у 2025 р. Для Польщі та Нідерландів відповідні

значення перебувають у межах 1,130–1,150 млрд л, для Франції становлять 1,050 млрд л. У звіті показники за 2024 р. мають оціночний характер, а за 2025 р. наведені як прогноз. Масштаби виробництва обґрунтовують актуальність контролю фактичного складу й властивостей сумішевого палива, що надходить від різних виробників.

Розвиток виробництва біопалива в Україні пов'язаний із диверсифікацією паливного забезпечення та використанням сировинного потенціалу аграрного сектору. Цей напрям поєднує завдання продовольчої, енергетичної, економічної та екологічної безпеки [6]. Перероблення місцевої сировини на моторне паливо розглядається як одна з можливостей зміцнення енергетичної безпеки держави [7]. Для машинно-тракторного парку реалізація такого потенціалу потребує узгодження виробництва з експлуатаційними вимогами та забезпечення стабільних властивостей палива на всьому шляху до споживача.

Ширший контекст використання аграрної сировини охоплює екологічну енергетику та формування енергетичної автономії підприємств на основі безвідходного виробництва [8, 9]. Технічне забезпечення заготівлі енергетичної сировини охоплює, зокрема, розроблення причіпного комбайна для збирання енергетичної верби [10].

Економічна доцільність застосування біопалива залежить від виробничої схеми, вартості сировини й умов використання кінцевого продукту. Порівняння варіантів перероблення сировини на базі фермерських господарств дає змогу оцінити ефективність окремих технологічних ланцюгів [11]. На рівні галузі враховують також соціально-економічні та екологічні результати розвитку виробництва [12]. Фінансові прогнози характеризують можливі сценарії за прийнятих вихідних умов [13]. Тому висновки щодо перспектив біопалива мають спиратися на чітке розмежування фактичних показників, розрахункових результатів і передумов їх отримання.

Екологічне оцінювання також потребує визначення меж аналізу. Методологія повного життєвого циклу охоплює виробництво сировини, перероблення, транспортування та використання палива [14]. Вимірювання

викидів двигуна характеризує лише експлуатаційну частину цього циклу [15]. Тому зменшення окремого компонента відпрацьованих газів не є достатньою підставою для висновку про загальну екологічну перевагу виробничого ланцюга. Комплексне оцінювання роботи двигуна враховує витрату палива, токсичність відпрацьованих газів та шкідливу дію діоксиду вуглецю [16]. Для цієї роботи визначальним є забезпечення відомого компонентного складу та зіставних температурних умов, за яких можна коректно порівнювати вихідні сигнали системи моніторингу.

Для експлуатації дизельного двигуна значення має фактичний стан палива, що надходить до паливної апаратури. Він визначається співвідношенням компонентів, наявністю небажаних домішок та змінами під час транспортування і зберігання. Тому дослідження сумішевого палива як об'єкта моніторингу має охоплювати його компонентний склад, фізико-хімічні властивості та чинники їх зміни.

У цій роботі сумішним паливом названо суміш ДП нафтового походження та біопалива. Властивості такої суміші залежать від співвідношення компонентів, їхнього походження, якості та умов зберігання. Схему формування сумішевого палива наведено на рисунку 1.3 [17, 18].

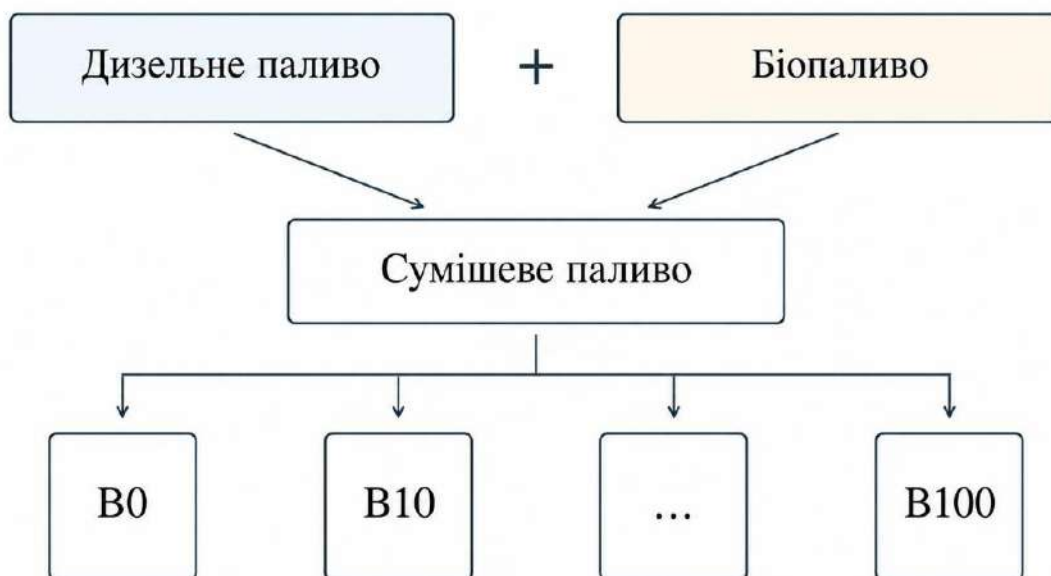


Рисунок 1.3 – Схема формування сумішевого палива на основі ДП та біопалива

Компонентний склад палива позначають  $B_x$ , де  $x$  характеризує об'ємну частку біопалива. На рисунку 1.3 показано ряд  $B_0, B_{10}, \dots, B_{100}$ :  $B_0$  відповідає ДП без додавання біопалива,  $B_{10}$  – суміші із заданою часткою біопалива 10 % об., а  $B_{100}$  – біопаливу без додавання ДП. Три крапки позначають проміжні співвідношення компонентів. Крайні позначення  $B_0$  та  $B_{100}$  наведено як межі діапазону складу, тоді як сумішевому паливу відповідають проміжні значення [19].

Наведена схема узагальнює зміну співвідношення ДП та біопалива в усьому діапазоні складу. Вона не обмежує перелік сумішей, які можуть бути використані для градуювання системи моніторингу. Контрольні проби необхідно добирати з урахуванням досліджуваного діапазону, властивостей вихідних компонентів та умов вимірювання. Такий підхід дає змогу зіставляти відгук системи за зміни частки біопалива й обґрунтовувати межі застосування отриманих залежностей.

Для дослідження впливу компонентного складу на вихідний сигнал доцільно розглядати вихідні компоненти  $B_0$  і  $B_{100}$  та проміжну суміш  $B_{50}$ . Таке поєднання дає змогу зіставити відгук системи на межах діапазону складу та перевірити його зміну для проміжного співвідношення компонентів. Застосування цих проб для дослідження СМЯСП не є підтвердженням допустимості їх використання в конкретному дизельному двигуні.

Властивості біопалива залежать від сировини, технології одержання та очищення, зокрема жирнокислотний склад пов'язаний із нижчою теплотою згоряння [20, 21]. Рослинна олія як добавка до ДП та продукти її хімічного перетворення утворюють різні паливні середовища [22]. Тому під час градуювання необхідно зазначати вид і характеристики компонентів: однакова частка біопалива не гарантує однакових властивостей різних партій.

ДП та біопаливо відрізняються молекулярною будовою. Першому властивий переважно вуглеводневий склад, тоді як молекули біопалива містять естерну групу. Відмінності складу зумовлюють зміну густини, в'язкості, змащувальної здатності, теплоти згоряння та електрофізичних властивостей

суміші. Для оцінювання цих змін необхідно враховувати походження компонентів і температуру, за якої визначено показник.

Зі збільшенням частки біопалива густина та кінематична в'язкість сумішевого палива переважно зростають. Зміна в'язкості впливає на подавання, розпилювання та сумішоутворення в дизельному двигуні. Додавання біопалива може поліпшувати змащувальну здатність низькосірчистого ДП, проте величину ефекту визначають склад компонентів і пакет присадок [23].

Нижча порівняно з ДП теплота згоряння біопалива зумовлює зменшення енергетичної цінності суміші зі збільшенням частки біопалива. За однакової потужності двигуна це може супроводжуватися зростанням витрати палива. Узагальнені напрями зміни основних властивостей показано на рисунку 1.4; конкретні значення залежать від характеристик вихідних компонентів.



Рисунок 1.4 – Характер зміни основних фізико-хімічних властивостей сумішевого палива зі збільшенням частки біопалива

Для кількісного зіставлення зазначених властивостей розглянуто палива B0, B50 та B100 із часткою біопалива 0, 50 та 100 % відповідно. Порівняння їхньої густини, кінематичної в'язкості, гігроскопічності, теплоти згоряння та окиснювальної стабільності наведено на рисунку 1.5.

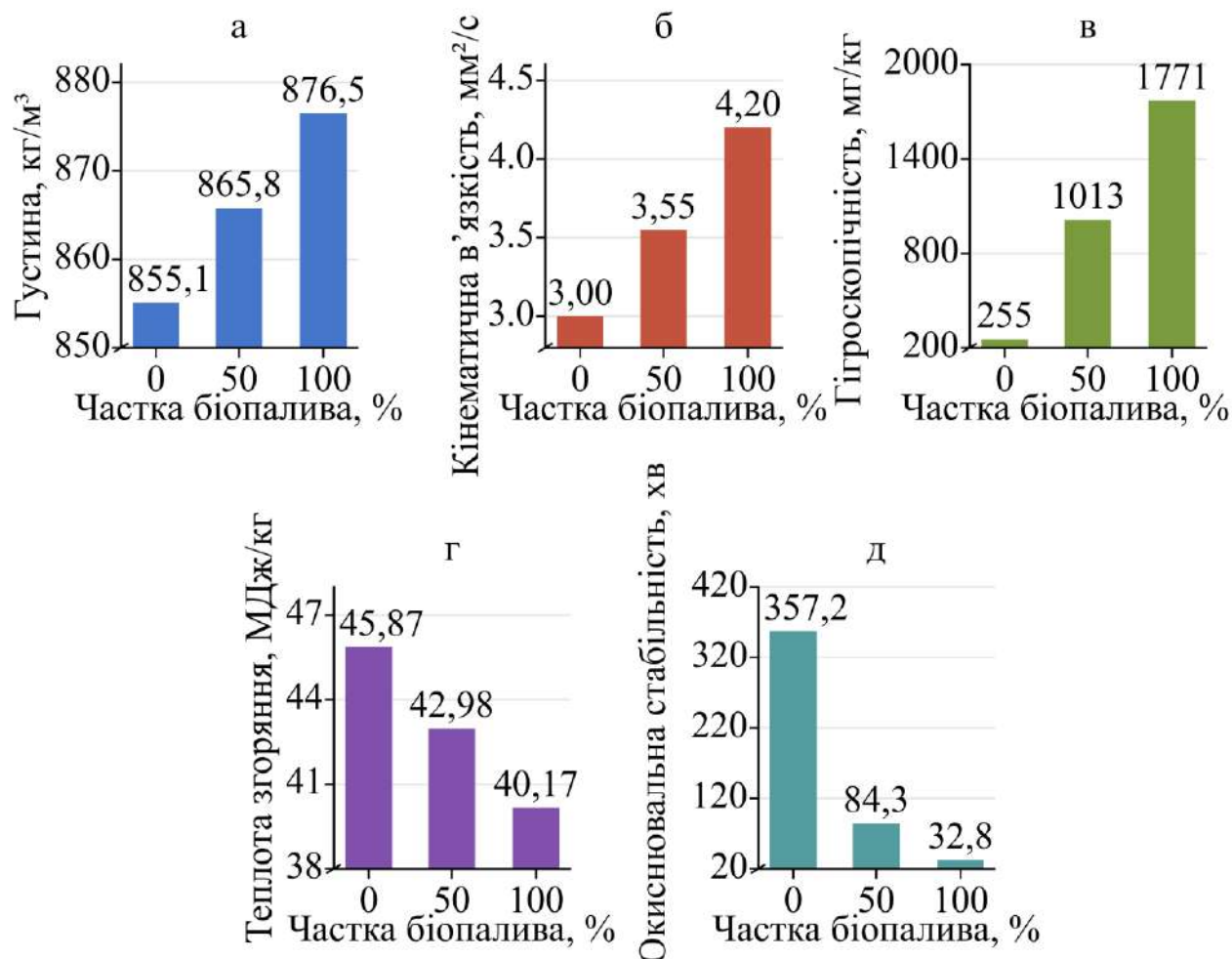


Рисунок 1.5 – Порівняння властивостей палив B0, B50 та B100: а – густина; б – кінематична в'язкість; в – гігроскопічність; г – теплота згоряння; д – окиснювальна стабільність

У представленому наборі даних зі збільшенням частки біопалива від 0 до 100 % густина зростає від 855,1 до 876,5  $\text{кг/м}^3$ , кінематична в'язкість – від 3,00 до 4,20  $\text{мм}^2/\text{с}$ , а показник гігроскопічності – від 255 до 1771  $\text{мг/кг}$ . Теплота згоряння зменшується від 45,87 до 40,17  $\text{МДж/кг}$ , окиснювальна стабільність – від 357,2 до 32,8 хв. Густину, кінематичну в'язкість, гігроскопічність, теплоту згоряння та окиснювальну стабільність наведено у відповідних одиницях вимірювання. Розриви вертикальних осей позначають пропущені інтервали

шкал. Наведені числові значення характеризують конкретні зразки та умови їх випробування і не є універсальними для всіх палив з однаковою часткою біопалива.

Застосування біопалива потребує узгодження його властивостей із параметрами сумішоутворення й паливоподачі, зокрема за наявності спиртових добавок [24, 25, 26]. Дослідження паливних сумішей із трьох компонентів охоплюють математичний опис їхнього складу, розрахунок та експериментальну перевірку показників роботи двигуна [27, 28, 29]. Екологічні показники і витрату палива порівнюють за зіставних режимів роботи [30, 31, 32, 33].

У розглянутих працях досліджено застосування рослинних олій та їхніх естерів у дизельних двигунах, показники роботи дизельних транспортних засобів, а також результати моделювання й дорожніх випробувань міського автобуса [34, 35, 36].

Ці дослідження визначають експлуатаційні умови порівняння палив. Для моніторингу необхідно окремо фіксувати компонентний склад, температуру та витрату через датчик, оскільки показники роботи двигуна не визначають безпосередньо склад або забрудненість палива.

Для автономних генераторів досліджують співвідношення компонентів, екологічні показники та кут випередження впорскування [37, 38, 39]. Витрату палива трактором оцінюють з урахуванням навантаження під час тягових і транспортних робіт [40, 41]. Застосування біопалива потребує узгодження виробництва, очищення, зберігання та подавання до двигуна [42, 43].

Властивості суміші розглядають разом із робочими процесами двигуна та характеристиками системи живлення [44, 45]. Для проточного моніторингу необхідно контролювати фактичний стан палива й умови його руху через датчик. При цьому витрату через проточний канал слід відрізняти від витрати палива двигуном. Вимоги до експлуатаційних властивостей палива та його використання в автотракторній техніці систематизовано в навчальному посібнику [46].

Однорідність сумішевого палива забезпечують дозуванням компонентів і вибором режиму перемішування відповідно до їхнього складу [47, 48, 49]. Геометрія змішувача та рух частинок визначають інтенсивність цього процесу [50, 51]. Для дослідження датчика важлива відтворюваність підготовки проб: за однакового середнього складу локальна неоднорідність у ділянці контролю може змінювати вихідний сигнал.

Для подальшого аналізу необхідно розмежувати зміну властивостей унаслідок зміни частки біопалива та зміну, зумовлену забрудненням або старінням.

## 1.2 Чинники зміни якості сумішевого палива та вимоги до його контролю

Властивості сумішевого палива визначаються співвідношенням і характеристиками вихідних компонентів, температурою та наявністю небажаних домішок. Зміну заданої частки біопалива необхідно розглядати окремо від змін, спричинених надходженням води, механічних частинок і накопиченням продуктів старіння. Класифікацію компонентів і небажаних домішок, що впливають на якість сумішевого палива, наведено на рисунку 1.6.

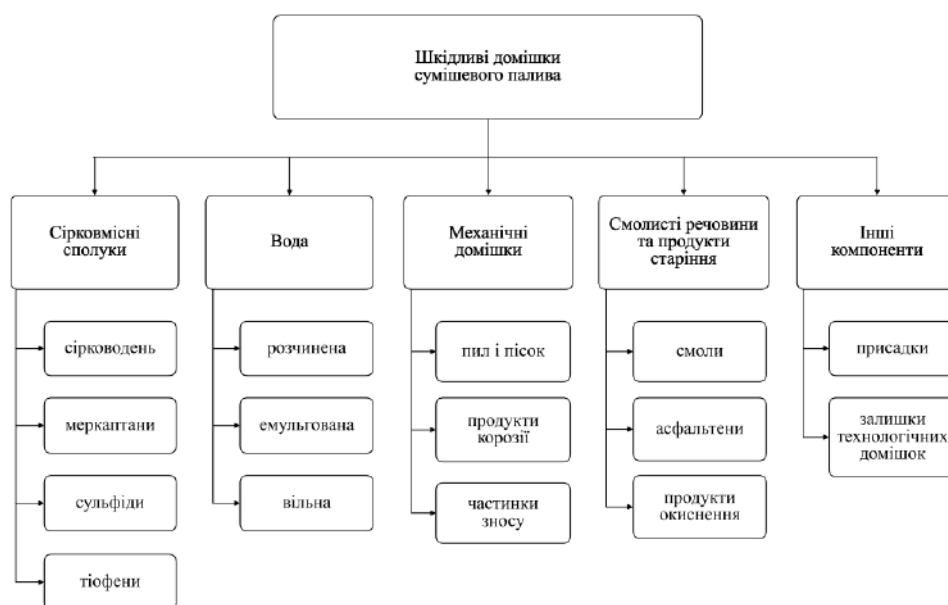


Рисунок 1.6 – Класифікація компонентів і небажаних домішок, що впливають на якість сумішевого палива

До основних забруднень сумішевого палива належать вода, механічні частинки, продукти корозії, смолисті та нерозчинні продукти окиснення, мікробіологічні утворення, технологічні залишки й сторонні нафтопродукти. Окремо необхідно враховувати сірковмісні сполуки, вміст яких нормується для товарного ДП. Функціональні присадки вводять до складу палива цілеспрямовано, однак їхній вид і концентрація також можуть змінювати фізико-хімічні та електрофізичні властивості сумішевого палива.

Забруднення палива впливає на ефективність роботи двигуна та техніко-економічні показники машинно-тракторного агрегату [52, 53]. Контроль лише під час приймання партії не характеризує подальших змін її стану. Паспортні показники стосуються відібраної проби на момент випробування, тоді як під час зберігання й подавання до двигуна можливе додаткове забруднення. Для надійності паливної апаратури важливі також змащувальні властивості дизельного палива і стійкість матеріалів пар тертя форсунок до утворення задирів [54, 55].

До цього напрямку належить також праця, присвячена впливу домішок на термодинамічні параметри робочого циклу [56]. Цей напрям пов'язує контроль складу палива з подальшим аналізом робочого процесу двигуна.

Основні джерела та чинники зміни якості палива під час змішування, транспортування, зберігання, заправлення й використання узагальнено в таблиці 1.1.

*Таблиця 1.1*

**Чинники зміни якості сумішевого палива на етапах його підготовки  
та використання**

| Етап       | Обладнання[57, 58, 59, 60, 61]                                                              | Чинники зміни якості                                                   |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Змішування | <br>[57] | Неточне дозування;<br>Неповне перемішування;<br>Домішки в компонентах. |

| Етап            | Обладнання[57, 58, 59, 60, 61]                                                              | Чинники зміни якості                                                    |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Транспортування | <br>[58]   | Залишки попередніх вантажів;<br>Волога в цистерні;<br>Продукти корозії. |
| Зберігання      | <br>[59]   | Конденсація вологи;<br>Окиснення палива;<br>Накопичення осаду.          |
| Заправлення     | <br>[60]  | Забруднення шлангів;<br>Пил і вода;<br>Змішування різних партій палива. |
| Використання    | <br>[61] | Забруднення бака;<br>Продукти зношування;<br>Відкладення.               |

Здатність сумішевого палива поглинати воду та його стійкість до окиснення залежать від складу вихідних компонентів, початкового вмісту води, наявності продуктів окиснення та застосованих присадок. Тому палива з однаковою часткою біопалива можуть відрізнятися за зміною властивостей під час зберігання. Під час оцінювання цих змін необхідно враховувати контакт із повітрям, температуру та матеріал ємності [62].

**Вода у сумішевому паливі.** Розчинена вода перебуває в паливі на молекулярному рівні й не утворює окремих крапель. Емульгована вода міститься у вигляді дрібних крапель, розподілених у паливі. Вільна вода утворює окрему водну фазу, яка може накопичуватися на дні ємності. Ці стани

необхідно розрізняти, оскільки вони впливають на розподіл води у пробі та її контакт з електродами датчика [63].

Вода сприяє корозії, погіршенню змащування та порушенню роботи прецизійних пар; за низьких температур можливе утворення льоду й перекриття фільтрів. Різні форми води потребують різних способів виявлення. ISO 12937 описує визначення води кулонометричним титруванням Карла Фішера [64]. Візуальний огляд дозволяє помітити окрему водну фазу або помутніння, проте прозорість проби не є кількісною характеристикою її вологості.

**Механічні домішки.** До них належать пил, продукти корозії та зношування, волокна фільтрів і тверді продукти старіння палива. Їхній вплив визначають розмір, твердість, форма й кількість частинок, особливо співмірних із зазорами прецизійних пар; оцінювання лише масового вмісту недостатньо [65]. Домішки порушують герметичність з'єднань, дозування та розпилювання палива, а їх накопичення у фільтрах збільшує гідравлічний опір і погіршує стабільність паливоподачі.

На рисунку 1.7 показано накопичення осаду та забруднення фільтрувального елемента.

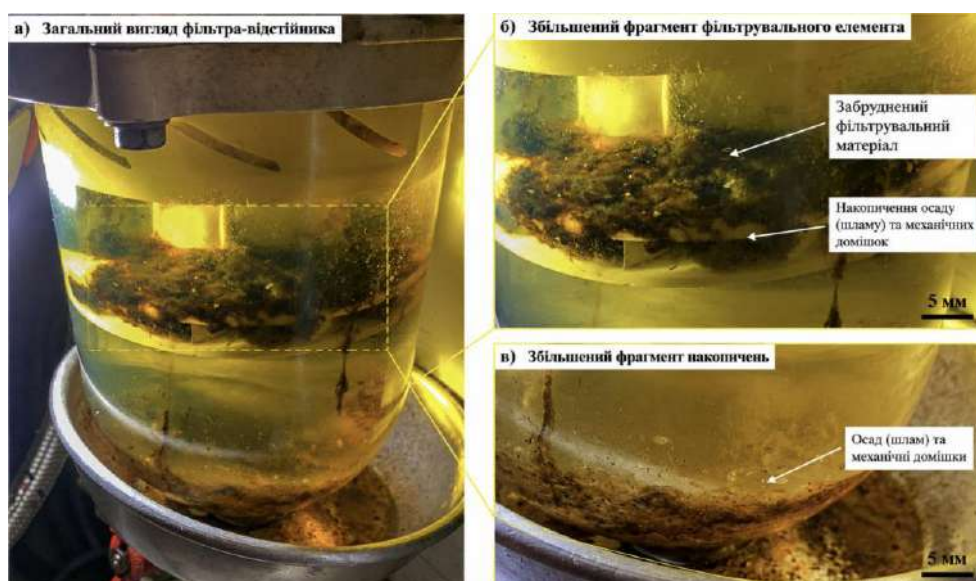


Рисунок 1.7 – Забруднення фільтра-відстійника: а – загальний вигляд; б – забруднення фільтрувального елемента; в – осад у нижній частині колби

Візуальне спостереження дає змогу виявити неоднорідність середовища, проте не визначає хімічний склад осаду. Для встановлення виду та кількості домішок необхідні додаткові вимірювання. У СМЯСП відхилення вихідного сигналу від базового значення має розглядатися як підстава для уточнювального контролю.

Фільтрація зменшує забрудненість палива, а моніторинг характеризує його стан у місці встановлення датчика [66]. Перед фільтром контролюють паливо, яке надходить на очищення, після нього – паливо, що подається до насоса високого тиску. Друге розташування відповідає контролю середовища, з яким контактують прецизійні елементи. Під час установлення датчика необхідно враховувати домішки, що проходять через фільтр, допустимий гідравлічний опір і стабільність паливоподачі [67]. Неповне заповнення ділянки контролю та несталий потік можуть змінювати сигнал без зміни складу палива.

**Продукти старіння палива.** Окиснення під час зберігання спричиняє утворення кислот, пероксидів, смолистих і нерозчинних продуктів. Інтенсивність процесу залежить від складу палива, температури, доступу кисню та присадок [19]. Продукти старіння підвищують кислотність, утворюють відкладення й погіршують фільтрованість. За сезонного зберігання додатковий ризик створюють конденсація води та надходження накопиченого осаду до паливної системи після відновлення роботи.

**Мікробіологічне забруднення.** За наявності вільної води на межі «паливо–вода» можуть розвиватися мікроорганізми. Продукти їхньої життєдіяльності – слизоподібні відкладення, кислоти й тверді частинки – засмічують фільтри та посилюють корозію. Отже, вода є також чинником утворення вторинних забруднень. Окрему групу становлять технологічні залишки виробництва біопалива. Їх видалення, зокрема відокремлення гліцериновмісної фази, є самостійним завданням очищення продукту [68]. Фізико-хімічні та біологічні особливості біопалива також мають значення для його експлуатаційної придатності [69]. Тому зміна заданої частки якісного біопалива та наявність виробничих залишків повинні розглядатися як різні

чинники. Базове градування доцільно будувати на компонентах з установленими характеристиками, після чого окремо визначати відгук на технологічні залишки й інші домішки.

**Сірковмісні сполуки.** Загальний уміст сірки характеризує сумарний уміст елемента сірки в усіх сірковмісних компонентах палива незалежно від виду сполук. Цей показник визначають спеціалізованими аналітичними методами. Його значення не характеризує безпосередньо корозійну активність окремих сполук або змащувальну здатність палива. Вихідний сигнал СМЯСП залежить також від води, частки біопалива та продуктів старіння, тому його зміну не можна однозначно пов'язувати з концентрацією сірки без незалежного аналізу. Вплив умісту сірки в паливах на сільськогосподарські машини розглянуто в праці [70].

**Функціональні присадки.** Їх вводять для підвищення окиснювальної стабільності, поліпшення низькотемпературних властивостей, очищення та захисту паливної апаратури. За відповідності нормативним вимогам присадки не є шкідливими домішками. Відмінності їхнього складу необхідно враховувати під час установлення базового сигналу та порівняння різних партій палива.

Біопаливо є передбаченим компонентом суміші; його додавання може поліпшувати змащувальні властивості та довговічність плунжерних пар [71, 72]. Величина такого ефекту залежить від характеристик біопалива, тому його слід оцінювати за незалежного контролю небажаних домішок. Збільшення частки біопалива саме по собі не означає погіршення якості. Завдання моніторингу полягає у виявленні відхилень від установленного стану придатної суміші.

Діагностування паливної апаратури охоплює аналіз вібраційних показників паливоподачі, автоматизований контроль системи Common Rail та оцінювання стану окремих елементів автотракторного дизеля [73, 74, 75, 76]. Такі засоби характеризують роботу обладнання й доповнюють вимірювання властивостей палива. Зіставлення цих даних допомагає розмежувати

відхилення стану паливного середовища та порушення роботи апаратури. Експрес-контроль сірковмісних сполук розглядають також як складову технічного сервісу сільськогосподарської техніки [77].

Залишковий ресурс паливної апаратури оцінюють за допомогою математичних методів малих відхилень і моделювання процесу впорскування [78, 79]. Об'єктом такого оцінювання є стан обладнання, сформований під спільною дією властивостей палива й умов експлуатації. Для встановлення впливу конкретної домішки розрахунки ресурсу необхідно доповнювати незалежними вимірюваннями характеристик палива.

Надійність автотракторного дизеля визначається станом взаємопов'язаних систем, зокрема справністю елементів охолодження [80, 81]. Тому зміна показників двигуна сама по собі не доводить погіршення якості палива. Окремий канал контролю паливного середовища дає інформацію, яку необхідно зіставляти з результатами діагностування двигуна.

Перевірка відповідності палива нормативним вимогам передбачає встановлення його виду, сфери застосування та переліку показників, які підлягають контролю. Вимоги до ДП, біопалива як компонента та готових сумішей задають різними документами. У європейській практиці відповідні напрями охоплюють серії EN 590, EN 14214 і EN 16709; у США – ASTM D6751 та ASTM D7467. Перелік основних документів і межі їх застосування узагальнено в таблиці 1.2 [82, 83].

*Таблиця 1.2*

**Основні нормативні документи щодо ДП, біопалива та їх сумішей**

| <b>Документ</b>           | <b>Об'єкт регулювання</b>                                  |
|---------------------------|------------------------------------------------------------|
| EN 590 (редакція 2025 р.) | Автомобільне ДП: вимоги й методи випробувань               |
| EN 14214                  | Біопаливо як паливо або компонент паливних сумішей         |
| EN 16709                  | Дизельні палива з підвищеним умістом біопалива – B20 і B30 |

| Документ             | Об'єкт регулювання                                                                                 |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM D6751           | B100 як компонент змішування з дистилатними паливами                                               |
| ASTM D7467           | Дизельні суміші з умістом біопалива B6–B20                                                         |
| Постанова КМУ № 1482 | Альтернативне паливо для дизельних двигунів: понад 7 і до 30 % об. естерів; чинність із 25.11.2026 |

Національні технічні умови на ДП наведено в ДСТУ 7688:2015 [84]. Вимоги до властивостей палива необхідно відрізнити від вимог до викидів двигуна: Регламент (ЄС) 2016/1628 визначає обмеження викидів та процедури затвердження типу двигунів позашляхової мобільної техніки [85]. Відповідність палива своїй специфікації й відповідність двигуна екологічним вимогам установлюють різними випробуваннями. Контроль палива забезпечує інформацію про один із чинників експлуатації та не підмінює сертифікаційного випробування двигуна.

В Україні постановою Кабінету Міністрів України від 19 листопада 2025 р. № 1482 затверджено Технічний регламент щодо вимог до палив моторних альтернативних. Щодо палива для дизельних двигунів цей регламент поширюється на паливо з об'ємною часткою біопалива понад 7 % і не більше 30 %. Постанова набирає чинності через рік після опублікування – 25 листопада 2026 р.; станом на 6 вересня 2026 р. її вимоги розглядаються як затверджені до подальшого введення в дію [86].

Нормативне позначення B10, B20 або B30 у цьому регламенті характеризує інтервал умісту естерів. Відповідно, товарне паливо B20 не слід автоматично ототожнювати з лабораторною пробой, приготовленою з точною часткою біопалива 20 % об. Для градування системи необхідно фіксувати фактичний склад проби та метод його встановлення.

Під час встановлення переліку контрольованих показників необхідно також враховувати воду, тверді домішки, густину, в'язкість та окиснювальну стабільність. Метод випробування і граничне значення кожного показника

обирають відповідно до специфікації конкретного палива. Визначення цих характеристик формує незалежну основу для перевірки відгуку системи моніторингу.

Технічні вимоги стосуються, зокрема, вмісту сірки, температури спалаху, фракційного складу, цетанового числа, низькотемпературних властивостей і змашувальної здатності. Вибрані показники наведено в таблиці 1.3. Ці вимоги застосовують у межах сфери дії відповідного документа; перенесення їх на всі види ДП потребує окремого обґрунтування.

*Таблиця 1.3*

**Вимоги до сумішевого палива для дизельних двигунів за додатком 3 до постанови КМУ № 1482 [86]**

| Показник                                                                  | Одиниця | Вимога                |
|---------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------|
| Загальний уміст сірки                                                     | мг/кг   | Не більше 10          |
| Температура спалаху в закритому тиглі                                     | °C      | Не нижче 55           |
| Температура перегонки 95 % об'єму                                         | °C      | Не вище 360           |
| Цетанове число літнього / зимового палива                                 | —       | Не менше 51 / 49      |
| Гранична температура фільтрованості: літній / перехідний / зимовий період | °C      | Не вище +5 / -5 / -20 |
| Змашувальна здатність: діаметр плями зношування за 60 °C                  | мкм     | Не більше 460         |
| Об'ємна частка естерів для B10                                            | % об.   | Понад 7 до 10         |
| Об'ємна частка естерів для B20                                            | % об.   | Понад 10 до 20        |
| Об'ємна частка естерів для B30                                            | % об.   | Понад 20 до 30        |

Незалежну перевірку сигналу СМЯСП виконують за характеристиками контрольних проб, визначеними методами відповідної паливної специфікації. Для визначення сірки метод і калібрувальні матеріали добирають за типом паливної матриці та потрібним діапазоном; відповідні підходи розглянуто в

підрозділі 1.3. Інтегральний сигнал датчика не забезпечує незалежного визначення всіх показників якості.

Нормативний контроль установлює відповідність палива вимогам, а моніторинг виявляє зміни його стану під час експлуатації. Для СМЯСП ознакою таких змін є відхилення від базового сигналу за заданого складу, відповідної температури та сталих параметрів вимірювального каналу. Поріг відхилення обґрунтовують за розсіюванням повторних відліків і перевіркою на контрольних пробах.

### **1.3 Аналіз методів контролю якості сумішевого палива**

Методи контролю сумішевого палива доцільно зіставляти за видом інформації, яку вони надають, і за можливістю застосування в умовах експлуатації. Лабораторні методи визначають склад або окремі нормовані показники; портативні засоби дають змогу виконувати аналіз у місці відбирання проб; вбудовані засоби реєструють зміну властивостей безпосередньо у паливній магістралі. Для вибору принципу системи необхідно узгодити потрібну чутливість, селективність, тривалість вимірювання та умови встановлення [87, 88].

Системи контролю якості можуть поєднувати лабораторний аналіз, проточні вимірювання та інтелектуальний аналіз даних. Інтелектуальний аналіз у цьому огляді охоплює методи виявлення закономірностей і розпізнавання станів за вимірювальними ознаками. Реалізацію конкретного алгоритму в дослідному зразку визначає опис його програмного забезпечення.

Для застосування СМЯСП у ділянці низького тиску системи живлення дизельного двигуна необхідно забезпечити швидкодію, достатню для реєстрації досліджуваних змін стану палива, можливість вимірювання без складної підготовки проб та цифрового оброблення сигналу. Конструкція СМЯСП має бути пристосована до температурних змін, вібрацій і пульсацій потоку. Під час інтерпретації показів необхідно враховувати температуру та базовий

компонентний склад палива, оскільки обидва чинники впливають на вихідний сигнал.

Основні методи контролю якості сумішевого палива згруповано за принципом отримання інформації та способом аналізу проби (рисунок 1.8). Схема охоплює спектральні, хроматографічні, електрохімічні й електричні методи, діелектричні вимірювання, а також фізичне виділення та аналіз частинок. Діелектричні методи виділено окремо через їхнє значення для досліджуваної СМЯСП; за фізичною основою вони належать до ширшої групи електричних методів.



Рисунок 1.8 – Основні методи контролю домішок у сумішевих паливах

На рисунку 1.8 спектральні методи представлені XRF-аналізом, УФ-флуоресценцією та ІЧ-спектроскопією; хроматографічні – розділенням компонентів із подальшим детектуванням. Електрохімічні підходи передбачають реєстрацію заряду або потенціалу, пов'язаних з аналітичною реакцією; до них у цьому огляді віднесено кулонометричне виконання титрування Карла Фішера. Електричні вимірювання характеризують

провідність і комплексний опір, а виділена діелектрична група – поляризаційні властивості середовища та їх перетворення у вимірюваний сигнал. Межі цих груп частково перетинаються: імпедансні вимірювання можуть застосовуватися і в діелектричній спектроскопії.

**Спектральні методи.** Рентгенофлуоресцентний аналіз (XRF) та ультрафіолетову флуоресценцію застосовують для визначення загального вмісту сірки, а інфрачервону спектроскопію (IR, FTIR, NIR) – для оцінювання молекулярного складу й показників палива за відповідного градування. Методи відрізняються походженням сигналу, підготовкою проби та змістом результату, тому їх порівнюють для конкретної аналітичної задачі [89].

Рентгенофлуоресцентний аналіз ґрунтується на реєстрації характеристичного випромінювання елементів після збудження проби. Енергодисперсійний і хвиледисперсійний варіанти визначення сірки описано, зокрема, в ASTM D4294 та ASTM D2622 [90, 91]. Перевагою є аналіз без спалювання проби. Результат залежить від матриці, градування, конструкції кювети та характеристик приладу, тому межу виявлення одного аналізатора не слід поширювати на всі засоби XRF.

У методі ультрафіолетової флуоресценції сірковмісні компоненти проби попередньо окиснюють, після чого реєструють флуоресцентний сигнал утвореного діоксиду сірки. Визначення загальної сірки цим способом регламентує ASTM D5453 [92]. Застосування методу потребує підготовленого газового тракту, стабільних умов перетворення проби та калібрувальних матеріалів. Ці особливості необхідно враховувати під час перевірки модельних проб.

Інфрачервона спектроскопія реєструє поглинання випромінювання молекулярними групами компонентів палива. Ближні ІЧ-спектри в поєднанні з багатофакторним градуванням використовують для оцінювання загального вмісту сірки, а середні ІЧ-спектри – для прогнозування кількох показників якості ДП [93, 94]. Застосовність таких залежностей визначається складом проб, використаних для градування; для іншої сировинної бази або діапазону

складу потрібна додаткова перевірка. Приклади приладів для аналізу палива наведено на рисунку 1.9. Портативну NIR-спектроскопію застосовують для аналізу складу палив, а градувальні моделі на основі NIR-спектрів – для оцінювання властивостей ДП [95, 96]. Для розрізнення сумішей ДП і біопалива досліджено також поєднання FTIR-спектрів із даними ізотопного аналізу вуглецю [97].

Кількісне оцінювання показника та класифікація проб є різними аналітичними задачами. Віднесення зразка до певної групи не дає безпосереднього значення концентрації домішки. Для застосування спектральної моделі необхідно визначити її цільову величину, склад калібрувальної вибірки та умови перевірки на незалежних пробах.

Поєднання інфрачервоного аналізу сірковмісних сполук із цифровим обробленням даних розглядається як напрям підвищення надійності вимірювань [98, 99]. Використання багатофакторних моделей дає змогу аналізувати сукупність ознак, однак потребує незалежного визначення складу калібрувальних проб. Для системи моніторингу необхідно перевіряти зв'язок спектральної або електричної ознаки з умістом сірки за зміни супутніх компонентів. Це визначає межі застосування алгоритму та запобігає тлумаченню неселективного відгуку як результату прямого аналізу сірки.



Рисунок 1.9 – Прилади для аналізу палива: а – аналізатор Antek 9000 з ультрафіолетовим флуоресцентним визначенням сірки; б – інфрачервоний Фур'є-спектрометр ERASPEC

Розглянуті прилади ілюструють різні способи формування аналітичного сигналу. Придатність конкретної моделі до визначення сірки або біопалива у паливі встановлюють за її технічною документацією та методикою вимірювання. Для досліджуваної системи спектральні методи становлять насамперед основу незалежного визначення складу проб і перевірки калібрувальних залежностей.

**Електрохімічні методи.** Електрохімічний аналіз ґрунтується на реєстрації струму, потенціалу або заряду, пов'язаних із перетворенням визначуваної речовини. Для розглянутих палив практичне значення мають кулонометричні методики, в яких кількість компонента визначають за електричним зарядом, витраченим на регламентовану реакцію. Це відрізняє їх від вимірювань електричних властивостей палива без реагентного перетворення проби.

Кулонометричне титрування Карла Фішера застосовують для визначення води, тоді як методи визначення сірки можуть передбачати попереднє перетворення проби. Вимірюваний заряд пов'язують із кількістю речовини, що бере участь у регламентованій реакції. Перевагою є можливість визначення конкретного компонента; обмеженнями для безперервного встановлення в паливній магістралі є витрата реагентів, підготовка проби й обслуговування вимірювального тракту.

На рисунку 1.10 наведено приклади засобів двох груп: кондуктометр реалізує електричне вимірювання провідності, а кулонометричний титратор – електрохімічне визначення компонента проби. Їх спільне зображення слугує порівнянню приладового виконання. Використання кондуктометра для сумішевого палива потребує сумісного первинного перетворювача та перевіреної методики.



Рисунок 1.10 – Приклади приладів для кондуктометрії та кулонометрії: а – кондуктометр Nach HQ440d; б – титратор Mettler Toledo C30

Хроматографічні методи дають змогу розділяти компоненти проби та визначати їх за сигналами відповідного детектора. Такий підхід є корисним для уточнення складу, але потребує підготовки проб, калібрувальних речовин і спеціалізованого обладнання. Для задачі постійного спостереження за паливом у машині вирішальними обмеженнями стають тривалість аналітичного циклу та складність приладового виконання. Вибір референтного методу має відповідати компоненту, який досліджується.

Електричні методи охоплюють кондуктометрію та імпедансні вимірювання. Вони дають змогу реєструвати зміни провідності й комплексного опору датчика за зміни складу та стану палива. Вимірювана характеристика відображає сукупний вплив компонентів середовища, тому її інтерпретацію пов'язують із градуванням, температурою та прийнятою моделлю вимірювання [100].

ASTM D2624 установлює методи визначення електропровідності авіаційних і дистильованих палив [101]. Провідність є самостійною характеристикою середовища, тому її зміну не можна автоматично ототожнювати зі зміною ємності датчика. Для схеми вимірювання тривалості заряджання  $RC$ -кола це особливо суттєво: струми витоку можуть впливати на заряджання й пороговий відлік. Під час градування необхідно перевіряти, чи

відповідає поведінка кола прийнятій моделі в діапазоні складу та температури досліджених проб.

Діелектричні методи ґрунтуються на зміні поляризаційних властивостей палива та відгуку датчика. Електричні характеристики використовують для оцінювання складу паливних сумішей, а низькочастотну діелектричну спектроскопію – для оцінювання вмісту води в зимовому ДП [102, 103]. Зміна частки біопалива та поява води можуть впливати на той самий вимірюваний параметр, тому ці задачі потребують окремих градуювальних залежностей. Зв'язок вихідного сигналу зі складом палива, температурою та геометрією електродів деталізовано в підрозділі 1.5 та розділі 2.

Перевагами електричних методів для вимірювання безпосередньо в паливній магістралі є відсутність реагентів, можливість повторних вимірювань і розміщення електродів у компактному корпусі з каналом для проходження палива. Приклади датчиків рівня та наявності води наведено на рисунку 1.11. Вони демонструють можливість роботи перетворювачів у паливному середовищі, проте мають інше призначення, ніж кількісне оцінювання складу багатокомпонентної суміші [104].

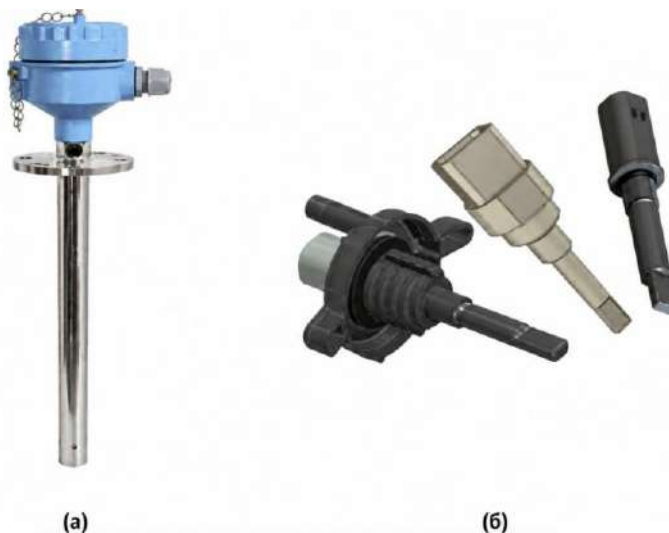


Рисунок 1.11 – Приклади датчиків для роботи в паливному середовищі: а – датчик рівня палива; б – датчик наявності води

Фізичне виділення та аналіз частинок охоплюють операції відокремлення домішок і подальшого оцінювання виділеної фази. На рисунку 1.8 до групи

фізичного виділення та аналізу частинок віднесено фільтрування з гравіметриєю, центрифугування, дистиляцію води, оптичний підрахунок і мікроскопію. Блок об'єднує способи роботи з різними домішками: дистиляція стосується виділення води, тоді як підрахунок і мікроскопія – оцінювання частинок. Такі підходи доповнюють електричний контроль відомостями про склад проби й характер забруднення.

Порівняння розглянутих методів доцільно проводити за вимірюваним показником, операціями з пробом та можливістю застосування безпосередньо в паливній магістралі. Межі виявлення конкретних домішок й тривалість аналізу визначають для конкретної методики та приладу, тому узагальнена оцінка не підміняє їхніх метрологічних характеристик.

Наведене порівняння показує, що лабораторні та вбудовані засоби доцільно поєднувати в єдиній методиці дослідження. Незалежний аналіз проб задає значення контрольованих показників, а вбудований вимірювальний канал реєструє відповідну зміну сигналу. Такий порядок дає змогу оцінити чутливість, повторюваність і вплив супутніх чинників без ототожнення інтегрального відгуку з результатом селективного аналізу.

За критеріями відсутності складної пробопідготовки, конструктивної простоти та можливості проточного виконання для подальшого дослідження обрано реєстрацію зміни електричних властивостей сумішевого палива за допомогою ДДП. Датчик включають до вимірювального каналу, в якому реєструють часовий параметр заряджання  $RC$ -кола та формують вихідний сигнал в умовних одиницях. Зв'язок цього сигналу з властивостями палива необхідно встановлювати з урахуванням компонентного складу, температури, геометрії електродів і параметрів вимірювального каналу СМЯСП.

Отже, завданням подальшого обґрунтування є встановлення зв'язку між складом і станом палива, параметрами датчика та вихідним сигналом. Для цього необхідно порівняти конструктивні рішення первинних перетворювачів і способи перетворення їхніх електричних параметрів у цифрову форму.

## 1.4 Аналіз конструкцій датчиків і систем моніторингу якості палива

Оснoву вимірювального каналу становлять ДДП та електронний блок зчитування й оброблення сигналу. Застосування СМЯСП передбачає також живлення, з'єднувальні лінії, контроль температури палива, установлення базових характеристик та подання результатів. Під час експерименту температуру контролюють окремим вимірювальним засобом [105].

Для ідеалізованого плоскопаралельного датчика з однорідним заповненням міжелектродного проміжку ємність визначають виразом:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}, \quad (1.1)$$

де  $C$  – ємність датчика, Ф;  $\varepsilon_0$  – електрична стала, Ф/м;  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність палива, безрозмірна;  $A$  – площа електродів, м<sup>2</sup> (площа взаємно перекритих робочих поверхонь);  $d$  – відстань між електродами, м. Залежність застосовна до ідеалізованого однорідно заповненого проміжку без урахування крайового поля та паразитної ємності.

Формула (1.1) описує залежність ємності датчика від властивостей палива та геометрії електродів. Чутливість вихідного сигналу СМЯСП додатково залежить від алгоритму зчитування. Тому конструктивні варіанти необхідно порівнювати за зміною вихідного сигналу на одиницю зміни досліджуваного фактора за незмінних інших умов. Зменшення відстані між електродами слід оцінювати також з урахуванням гідравлічного опору та можливості накопичення механічних домішок.

Конструкцію датчика визначають геометрія електродів, спосіб їх контакту з паливом, схема увімкнення у вимірювальне коло, спосіб перетворення сигналу та умови проходження потоку. Вибір цих параметрів повинен одночасно забезпечувати чутливість, стабільність, герметичність і мінімальний вплив на подачу палива.

За геометрією електродів розрізняють плоскопаралельні, коаксіальні та гребінчасті датчики. Окремою ознакою є спосіб організації вимірювальних

каналів: абсолютний або диференціальний. Це розмежування дає змогу порівнювати форму електродів незалежно від способу компенсації завад.

Плоскопаралельний датчик містить два плоскі електроди, між якими розміщується контрольоване паливо (рисунок 1.12, а). Він зручний для дослідження впливу площі електродів і відстані між ними, має просту геометрію та дає змогу організувати проходження палива через проміжок між електродами. До чинників похибки належать непаралельність електродів, крайове поле, неповне заповнення проміжку й відкладення на робочих поверхнях.

Коаксіальний датчик утворений внутрішнім електродом і зовнішньою циліндричною поверхнею (рисунок 1.12, б). Така геометрія сприяє екрануванню вимірювального об'єму та механічній жорсткості. Його характеристики визначають довжина ділянки контролю, співвідношення радіусів, точність центрування та умови очищення проточного проміжку.

Гребінчастий датчик містить систему зустрічних електродів на підкладці (рисунок 1.12, в). Його перевагою є компактність, однак розподіл поля залежить від геометрії смуг, підкладки та захисного покриття. Поверхневі плівки й осадження домішок можуть змінювати вихідний сигнал СМЯСП, що необхідно враховувати під час експлуатації.

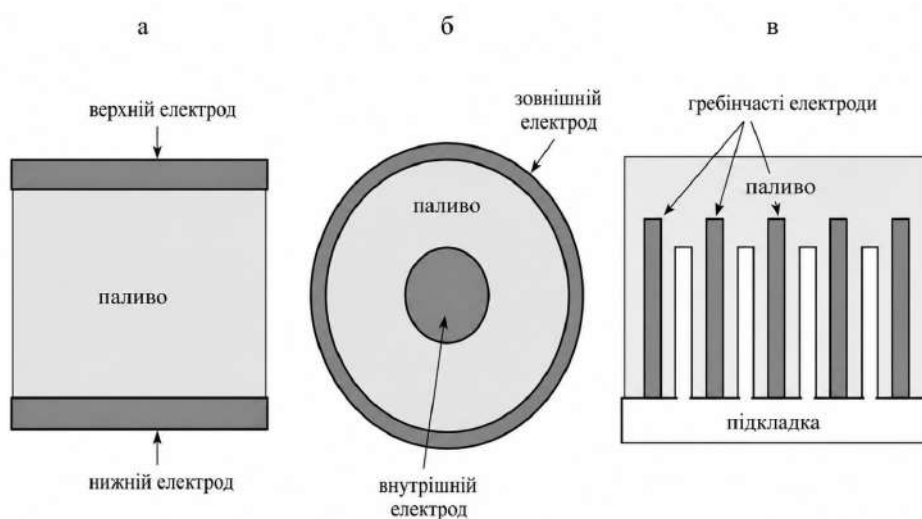


Рисунок 1.12 – Основні конфігурації електродів датчика: а – плоскопаралельна;  
 б – коаксіальна; в – гребінчаста

Для порівняння геометрій визначальними є чутливість до зміни властивостей середовища, відтворюваність розмірів, герметичність, можливість очищення та вплив на потік палива. Збільшення площі електродів доцільно оцінювати разом зі зміною габаритів, а зменшення відстані між електродами – разом із гідравлічним опором і ризиком накопичення забруднень.

За способом контакту з паливом розрізняють контактні та ізольовані електроди. Прямий контакт забезпечує більшу чутливість, але створює ризик корозії, поверхневої провідності за наявності води, осадження механічних частинок і формування смолистих плівок. Ізоляційне покриття з PTFE, скла або емалі підвищує довговічність, проте вводить додатковий діелектричний шар і зменшує корисний відгук. Для обох виконань важливими є сталість відстані між електродами, можливість очищення та відсутність застійних зон.

За способом перетворення параметрів датчика розглядають *RC*-схему, частотну та мостову або диференціальну схеми. У *RC*-схемі вимірюють тривалість заряджання чи розряджання до заданого порога, у частотній – зміну частоти генератора. Приклади двох варіантів наведено на рисунку 1.13. Вибір схеми має враховувати очікуваний діапазон сигналу, похибку перетворення та можливості цифрового відліку.

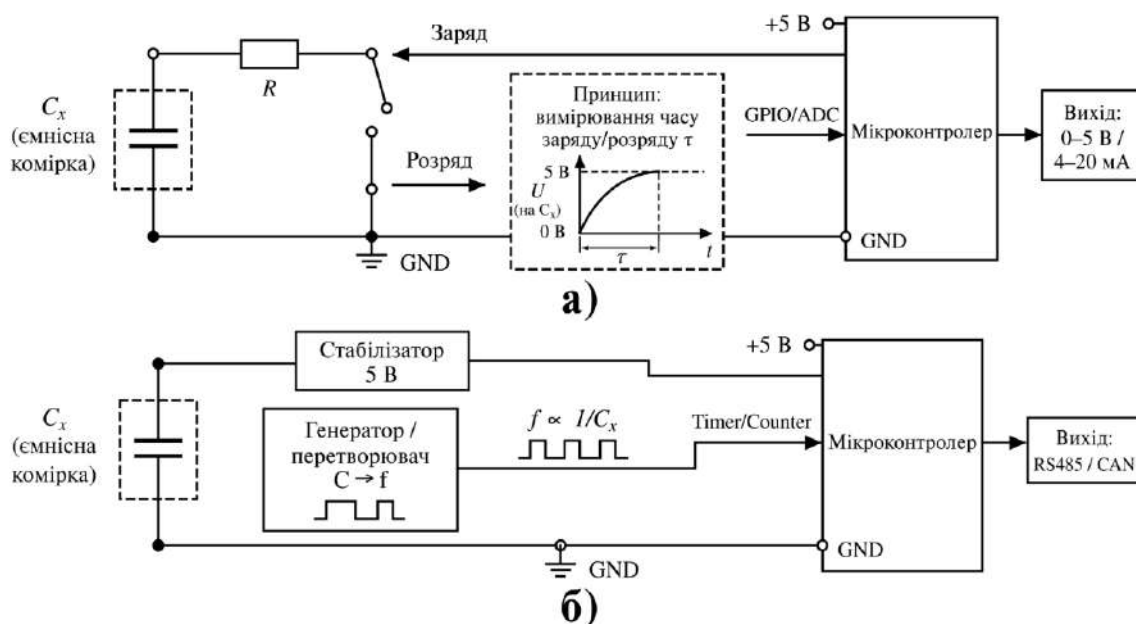


Рисунок 1.13 – Типові схеми перетворення параметрів датчика: а – *RC*-схема вимірювання часу; б – частотна схема

*RC*-схема дає змогу оцінювати зміну параметрів датчика за тривалістю заряджання до заданого порогового рівня. Реєстрований час досягнення порога необхідно відрізнати від сталої часу  $\tau$ : їхній зв'язок визначається опором кола, ємністю, початковою напругою та пороговим рівнем. За наявності провідності палива й паразитних елементів модель перетворення уточнюють. Ці залежності підлягають розгляду в теоретичному розділі роботи.

Конструктивні рішення доцільно порівнювати на трьох рівнях: форма електродів, виконання корпусу й проточної частини та організація вимірювального каналу. Однакова геометрія електродів може застосовуватися для різних задач, тому придатність датчика визначають разом із видом контролюваного середовища й алгоритмом інтерпретації сигналу. Вимірювання електричних властивостей застосовують також для контролю старіння моторної оливи [106] та стану оливи для електроерозійного оброблення [107]. Ці праці стосуються інших рідин, тому отримані в них залежності потребують окремої перевірки для паливних сумішей.

Розглянуті конструкції охоплюють датчик рівня на друкованій платі з опорними ділянками й захисним покриттям, герметичні сигналізатори відокремленої води Rochester Sensors 2100/2150, хвилевідний датчик води в ДП та багатозондовий перетворювач для трубопроводу, випробуваний на водно-етанольному середовищі [108, 109, 110, 111].

Ці рішення показують необхідність узгодження геометрії, захисного покриття, герметизації СМЯСП. Водночас контроль рівня, виявлення вільної води й оцінювання складу суміші є різними задачами. Зокрема, сигналізатори не призначені для водопаливних емульсій, а застосування конструкції до паливної магістралі потребує перевірки для відповідного середовища й габаритів [109, 111]. Окремим прикладом конструктивного рішення для іншого паливного середовища є запатентована вимірювальна насадка вмісту сірки в скрапленому газі [112].

Узагальнення конструктивних ознак, важливих для вибору власного рішення, наведено в таблиці 1.4. Порівняння стосується функціонального

призначення та будови пристроїв; воно не встановлює єдиного рейтингу точності засобів, які розв'язують різні вимірювальні задачі.

*Таблиця 1.4*

**Порівняння конструктивних рішень для контролю паливного середовища**

| <b>Рішення</b>            | <b>Конструктивна ознака</b>                              | <b>Значення для розроблення датчика</b>                                    |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Плоскопаралельний елемент | Дві поверхні; визначені площа й відстань між електродами | Змінювана геометрія, контроль паралельності та заповнення                  |
| Коаксіальний елемент      | Циліндричні електроди                                    | Центрування, кільцевий канал, очищення                                     |
| Гребінчастий елемент      | Електроди на підкладці                                   | Урахування розподілу електричного поля, покриття та поверхневих відкладень |
| Скварек, Еггерс           | Плата з опорними ділянками; захисне формування           | Вплив технологічних допусків і захисного шару                              |
| Rochester WIF             | Герметичний сигналізатор у фільтрі                       | Розмежування вільної води та емульсії                                      |
| Локонсоль та ін.          | Хвилевід у підкладці, щільна чутлива область             | Узгодження частоти, геометрії й вимірювального тракту                      |
| Спарма та ін.             | Кілька зондів у трубі                                    | Зіставлення каналів і просторового заповнення                              |

У проточному датчику електроди мають бути закріплені зі сталим взаємним розташуванням, а корпус і ущільнення повинні забезпечувати герметичність та проходження палива через ділянку контролю. Необхідно передбачити незмінність відстані між електродами після складання, повне заповнення проміжку паливом і доступ до робочих поверхонь для очищення.

Габарити електродів узгоджують із внутрішнім перерізом каналу, а приєднувальні елементи – із паливною магістраллю [113]. У цьому випадку конструкція датчика одночасно визначає вимірювальні та гідравлічні характеристики.

Матеріал електродів і корпусу вибирають з урахуванням контакту з ДП, біопаливом та водою, яка може міститися в паливі. Для ізольованих електродів у розрахунок необхідно включати товщину й властивості покриття; для відкритих поверхонь – враховувати стан поверхні електродів, що контактує з паливом. Під час порівняння конструктивних варіантів необхідно застосовувати однакові способи закріплення електродів і герметизації корпусу, щоб оцінювати вплив зміни геометрії за зіставних умов.

Електронне регулювання паливоподачі дає змогу задавати співвідношення компонентів дозованої суміші, а адаптивні алгоритми пов'язують керування зі споживанням біопалива [114, 115]. У такій структурі вимірювальний канал забезпечує інформацію про фактичний стан палива, тоді як керувальний алгоритм визначає дію виконавчих елементів. Інтеграція СМЯСП у систему живлення дизельного двигуна потребує узгодження цих функцій.

Площу електродів слід розглядати разом із довжиною й шириною ділянки контролю. Однакова площа за різного співвідношення сторін може відповідати різним проточним каналам і крайовим ефектам. Аналогічно, зменшення відстані між електродами змінює не лише електричний відгук, а й умови проходження палива. Тому конструктивне обґрунтування має містити порівняння чутливості, повторюваності показів та втрати тиску для заданої витрати.

ЕБ забезпечує зчитування, оброблення та індикацію вихідного сигналу СМЯСП. Приклади платформ для макетування наведено на рисунку 1.14.

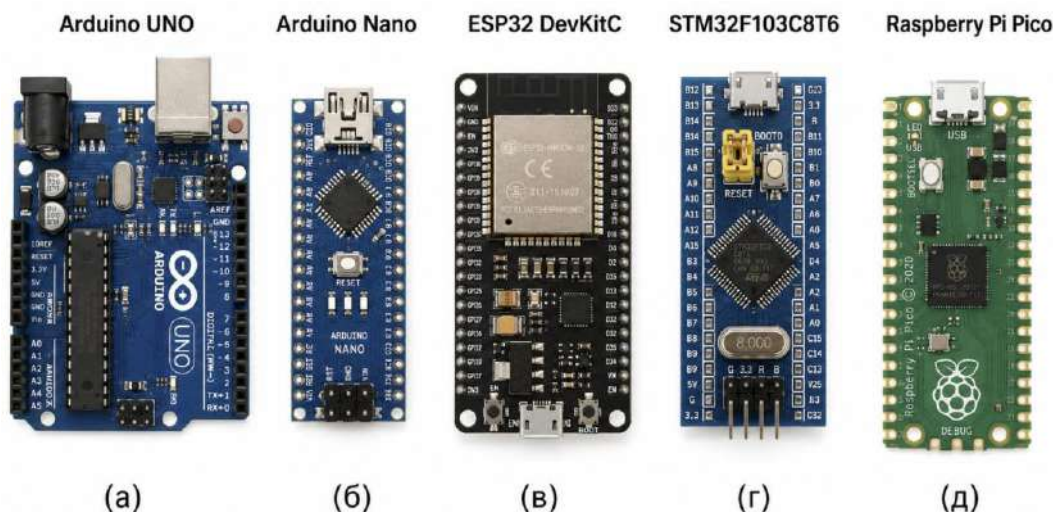


Рисунок 1.14 – Приклади платформ для макетування вимірювальної системи: а – Arduino Uno; б – Arduino Nano; в – ESP32 DevKitC; г – STM32F103C8T6; д – Raspberry Pi Pico

За результатами конструктивного аналізу для подальшого дослідження доцільно прийняти плоскопаралельний ДДП у проточному корпусі. Така конструкція дає змогу досліджувати вплив геометричних параметрів електродів на вихідний сигнал і узгоджувати їх із параметрами проточної частини. Адаптація ДДП до наявної паливної магістралі має передбачати сумісність приєднувальних розмірів, герметичність з'єднань, можливість підключення ЕБ та доступність для обслуговування за мінімальних змін компоновки системи живлення. Гідравлічну придатність конструкції необхідно оцінювати за фактичною витратою через місце встановлення та допустимим для цієї ділянки перепадом тиску. Остаточні розміри датчика й умови його застосування підлягають теоретичному та експериментальному обґрунтуванню.

### 1.5 Огляд аналітичних і експериментальних досліджень контролю якості сумішевого палива

Електричний відгук датчика залежить від компонентного складу палива, домішок, температури та будови вимірювального пристрою. Для опису цих впливів використовують моделі ефективних властивостей суміші, аналітичні

моделі вимірювального перетворення й емпіричні залежності. Їх зіставлення дає змогу простежити формування сигналу від властивостей середовища до зареєстрованого показу.

**Для опису ефективних властивостей суміші застосовують залежності, які враховують частки та властивості її компонентів.** У праці J. Corach, P. A. Sorichetti та S. D. Romano розглянуто оцінювання вмісту біопалива за проникністю сумішей із ДП у діапазоні складу від 0 до 100 % [116]. Математичною основою такого підходу є залежність властивості суміші від часток і властивостей компонентів. Характерні форми цих залежностей наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Моделі ефективної діелектричної проникності суміші [117, 118]

| Модель і джерело                  | Рівняння                                                                                                                                                                                                                | Умови застосування                                                       |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Лінійне правило                   | $\varepsilon_m = (1 - \varphi_b)\varepsilon_d + \varphi_b\varepsilon_b$                                                                                                                                                 | Початкове наближення залежності від складу за однакових умов вимірювання |
| Логарифмічне правило Ліхтенеккера | $\ln \varepsilon_m = (1 - \varphi_b)\ln \varepsilon_d + \varphi_b \ln \varepsilon_b$                                                                                                                                    | Нелінійне наближення; відповідність структурі суміші потребує перевірки  |
| Модель Максвелла–Гарнетта         | $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \frac{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m + 2\varphi_i(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_m - \varphi_i(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}$                 | Розріджені сферичні включення в неперервній основі                       |
| Модель Бруггемана                 | $(1 - \varphi_i) \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_{\text{eff}}} + \varphi_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{\text{eff}}} = 0$ | Самоузгоджене наближення для ізотропної двофазної суміші                 |

У таблиці  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_b$  та  $\varepsilon_m$  – відносні проникності ДП, біопалива й паливної основи відповідно;  $\varepsilon_i$  – проникність включень;  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – ефективна проникність основи з включеннями;  $\varphi_b$  і  $\varphi_i$  – об’ємні частки біопалива та включень. Частки виражають у частках одиниці; для вмісту біопалива  $B$  у відсотках приймають  $\varphi_b = B/100$ .

Лінійне й логарифмічне правила відтворюють властивості чистих компонентів, але по-різному описують проміжний склад. Їх зіставляють за однакових вихідних палив, температури та частоти. Застосовність правила Ліхтенеккера залежить також від геометрії й симетрії фаз, тому відповідність окремому набору даних не підтверджує його універсальності.

Модель Максвелла–Гарнетта описує включення в заданій неперервній основі, а модель Бруггемана – фази в середовищі з шуканою ефективною проникністю. Вибір залежить від структури суміші: розріджені краплі води, відокремлений водний шар та осад частинок потребують різних припущень. Застосовність обох моделей перевіряють для фактичного стану дисперсії.

В аналітичних моделях вимірювального перетворення електричні властивості палива за змінного поля характеризують комплексною відносною проникністю. Виділення поляризаційних втрат і внеску наскрізної провідності дає такий запис:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j[\varepsilon''_{\text{pol}}(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_0}], \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon^*(\omega)$  – комплексна відносна проникність;  $\varepsilon'(\omega)$  – її дійсна складова;  $\varepsilon''_{\text{pol}}(\omega)$  – складова втрат, зумовлена поляризацією;  $\sigma_{dc}$  – питома електропровідність за постійного струму, См/м;  $\varepsilon_0$  – електрична стала, Ф/м;  $\omega$  – кутова частота, рад/с;  $j$  – уявна одиниця. Знак у (1.2) відповідає часовій залежності гармонічного поля  $\exp(j\omega t)$ .

Цей опис розділяє накопичення електричної енергії та її втрати. Внесок провідності в уявну складову зростає зі зниженням частоти, тому вимірювання на одній частоті та визначення лише ємності не дають однакової інформації про паливо. Моделі таблиці 1.5 можна зіставляти за дійсними проникностями в

режимі малих втрат; за вираженої частотної залежності використовують комплексні властивості компонентів. Саме частотний підхід застосовано в дослідженні паливних сумішей [119]. Частотну залежність комплексної проникності описано, зокрема, в моделі Коула–Коула [120].

За малих втрат розрахована проникність визначає ємність датчика разом із геометрією електродів. Для однорідного середовища між паралельними електродами початковою залежністю є:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}} \frac{A}{d}, \quad (1.3)$$

де  $C$  – ємність датчика, Ф;  $\varepsilon_0$  – електрична стала, Ф/м;  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – відносна проникність середовища;  $A$  – площа електродів, м<sup>2</sup> (площа взаємно перекритих робочих поверхонь);  $d$  – відстань між електродами, м. У (1.3) приймають повне заповнення проміжку паливом і нехтують крайовими полями.

Залежність (1.3) показує, що зміна властивостей палива й зміна відношення  $A/d$  впливають на ту саму електричну величину. Збільшення площі підвищує ємність за сталої відстані між електродами; зменшення цієї відстані також підвищує її, але одночасно змінює умови проходження палива. Отже, геометрію датчика потрібно оцінювати за електричним відгуком і можливістю стабільного заповнення робочого проміжку.

У найпростішій еквівалентній схемі ємність доповнюють паралельною провідністю, що враховує активні втрати. Комплексний опір такої схеми визначають за законом Ома для гармонічного режиму:

$$Z(\omega) = \frac{1}{G + j\omega C}, \quad \omega = 2\pi f, \quad (1.4)$$

де  $Z(\omega)$  – комплексний опір, Ом;  $G$  – еквівалентна активна провідність, См;  $C$  – ємність, Ф;  $f$  – частота, Гц. У (1.4) параметри  $G$  і  $C$  відповідають прийнятому діапазону частот. Для однорідного плоскопаралельного проміжку внесок наскрізної провідності становить  $G = \sigma_{\text{dc}} A/d$ ; за поляризаційних втрат еквівалентна провідність охоплює також їхній внесок.

Із (1.4) для додатних  $G$  і  $C$  отримують фазовий кут імпедансу:

$$\psi = -\arctan\left(\frac{\omega C}{G}\right), \quad (1.5)$$

де  $\psi$  – фазовий кут імпедансу, рад. Залежність (1.5) показує, що фазовий відгук визначає співвідношення ємнісної та активної складових. За сталої  $G$  збільшення  $C$  підвищує модуль від’ємного кута; одночасна зміна  $G$  може послабити або змінити цей ефект. Фаза вихідної напруги перетворювача додатково залежить від його схеми, тому її не ототожнюють безпосередньо з  $\psi$ .

Перевагою моделі (1.4) є можливість розглядати активну й реактивну складові окремо. Вона придатна як початкове наближення до імпедансного вимірювання. За впливу електродної поляризації, неоднорідності поля або розподілених процесів параметри простої схеми потребують уточнення; саме тому порівняння конструкцій датчиків доповнюють частотними вимірюваннями.

У роботі I. S. dos Santos-Neto та співавторів аналітичний опис доповнено моделюванням поля методом скінченних елементів (FEM – Finite Element Method) і випробуванням виготовлених гребінчастих електродів [119]. Порівняно відстані між електродами 10, 20, 30 і 50 мкм. Для досліджених рідин варіант із відстанню між електродами 10 мкм мав найбільшу ємність. Розрахунки та вимірювання показали вплив крайового поля, тому перенесення плоскопаралельної залежності на таку конструкцію потребує врахування фактичного розподілу поля.

Імпедансні вимірювання в цій самій праці виконували за температури  $(21,0 \pm 0,1)$  °C у діапазоні від 1 Гц до 1 МГц. Відмінності між B0, B10 і B100 виразніше проявлялися в області 1–100 Гц, тоді як на високих частотах різниця сигналів зменшувалася. Таким чином, можливість розрізнення складу визначалась сукупністю геометрії та режиму електричного вимірювання.

Для часової реєстрації перехід від ємності до сигналу описують моделлю заряджання  $RC$ -кола. За нульової початкової напруги на конденсаторі та подавання сталої напруги живлення використовують залежність [121]:

$$U_c(t) = U_0[1 - \exp(-t/(RC))], \quad (1.6)$$

де  $U_c(t)$  – напруга на ємності в момент часу  $t$ , В;  $U_0$  – напруга живлення, В;  $R$  – опір заряджального резистора, Ом;  $t$  – час від початку заряджання, с. Добуток  $RC$  має розмірність часу та визначає швидкість наростання напруги. У (1.6) не враховано витоки й додаткові паразитні ємності.

Якщо пристрій реєструє досягнення заданої порогової напруги  $U_{\text{п}}$ , розв’язання (1.6) відносно часу дає:

$$t_{\text{п}} = -RC \ln(1 - \frac{U_{\text{п}}}{U_0}), \quad (1.7)$$

де  $t_{\text{п}}$  – час досягнення порога, с;  $R$  – опір заряджального резистора, Ом;  $U_{\text{п}}$  – порогова напруга, В;  $U_0$  – напруга живлення, В. Залежність (1.7) передбачає нульову початкову напругу,  $0 < U_{\text{п}} < U_0$  і незначний струм витоку.

Поєднання (1.3) та (1.7) пояснює вплив проникності, площі електродів і відстані між ними на часовий параметр перетворення. Вихідний цифровий сигнал додатково залежить від способу реєстрації та оброблення відліків. За помітної провідності палива або паразитної ємності проста пропорційність змінюється, тому експериментальну характеристику визначають для всього вимірювального каналу.

Емпірична модель безпосередньо пов’язує відгук виготовленого датчика з відомими властивостями проби. Н. Sumartono та співавтори досліджували контроль води в біопаливі за фазовим зсувом сигналу [122]. Використано електроди на скляній трубці та схему перетворення, роботу якої зіставляли з частотною характеристикою. Автори встановили зростання фазового зсуву зі збільшенням ємності та вмісту води й повідомили про вимірювання на рівні 800 ppm.

Дослідження I. S. dos Santos-Neto та Н. Sumartono зі співавторами використовують зміну електричних властивостей рідини, але мають різні контрольовані величини: частку біопалива та вміст води. Тому зростання одного вихідного сигналу без відомостей про склад основи не визначає

причину зміни. Градування за водою має відповідати заданій паливній основі, а оцінювання частки біопалива – визначеним умовам щодо домішок. Це впливає зі зіставлення вимірювальних задач розглянутих праць.

За сталої геометрії та режиму вимірювання температурний вплив у локальному інтервалі можна врахувати лінійною корекцією сигналу:

$$y_{corr} = y(B, T) - k_T(B)(T - T_0), \quad (1.8)$$

де  $y_{corr}$  – сигнал, приведений до опорної температури  $T_0$ ;  $y(B, T)$  – вимірний сигнал за складу  $B$  і температури  $T$ ;  $k_T(B)$  – температурний коефіцієнт за заданого складу, ум. од./К. У (1.8) коефіцієнт визначають для зібраного пристрою, тому він охоплює сумарний температурний вплив середовища й вимірювального каналу СМЯСП.

Для одночасного оцінювання кількох чинників застосовують регресійні моделі поверхні відгуку. Загальну модель другого порядку для трьох факторів подають у вигляді [123]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j, \quad (1.9)$$

де  $y$  – вихідний сигнал;  $x_i, x_j$  – кодовані фактори;  $b_0$  – вільний член;  $b_i, b_{ii}$  та  $b_{ij}$  – коефіцієнти лінійних, квадратичних членів і взаємодій відповідно;  $i, j$  – індекси факторів від 1 до 3. Лінійні члени описують основні впливи, квадратичні – кривизну залежності, а добутки факторів – зміну одного впливу за різних значень іншого.

На відміну від окремих однофакторних градувань, модель (1.9) дає змогу перевірити взаємодію складу палива, температури та площі електродів. Її коефіцієнти визначають за планованим експериментом, а відповідність перевіряють за відхиленнями прогнозу від вимірювань. Градувальну характеристику будують за пробами з відомими значеннями контрольованої величини, що охоплюють робочий діапазон [124].

Програму та методику експериментальної перевірки діелектричного експрес-контролю домішок у ДП розроблено в праці [125]. Ця праця поєднує підготовку контрольних проб із дослідженням відгуку вимірювального засобу.

Математичному опису контролю забрудненості за діелектричною проникністю присвячено також працю [126]. Цей напрям поєднує фізичний опис властивостей середовища з перевіркою сигналу на контрольних пробах.

Суміжний підхід до оцінювання стану експлуатаційних рідин розглянуто в дослідженнях М. І. Наглюка, присвячених діагностуванню охолоджувальних рідин автомобільних двигунів. Автор досліджував зв'язок електропровідності антифризів із показниками їхнього стану та вплив температури на результати вимірювань [127]. Для дослідження сумішевого палива цей підхід показує необхідність установа зв'язку електричного відгуку з конкретними змінами властивостей рідини. Водночас відмінності складу антифризів і палива та способів формування сигналу потребують окремого обґрунтування характеристик СМЯСП.

Наведені результати досліджень отримано для різних паливних середовищ, конструкцій електродів і способів реєстрації сигналу, що обмежує можливість їх безпосереднього перенесення на розроблювану проточну СМЯСП. Для обґрунтування її параметрів необхідно встановити спільний вплив частки біопалива, температури та площі електродів на вихідний сигнал за незмінних налаштувань вимірювального каналу. Базові характеристики, одержані для палива заданого складу, мають створити основу для подальшого оцінювання відхилень, пов'язаних зі зміною його стану. Вибір конструкції потребує зіставлення цих характеристик із гідравлічним опором, технологічністю виготовлення та умовами встановлення датчика в систему живлення дизельного двигуна.

## **1.6 Обґрунтування напряму вдосконалення СМЯСП**

Напрямок удосконалення СМЯСП полягає в обґрунтуванні геометричних параметрів ДДП та врахуванні впливу частки біопалива й температури на вихідний сигнал. Площу електродів вибирають за результатами зіставлення

вихідного сигналу, його повторюваності, габаритів ділянки контролю та втрат тиску під час проходження палива.

Кріплення електродів має забезпечувати їх паралельність і задану відстань між ними після складання датчика. Конструкція проточної частини повинна забезпечувати заповнення ділянки контролю паливом, герметичність з'єднань і доступ до електродів для очищення. До параметрів, що підлягають обґрунтуванню, належать площа електродів, відстань між ними, ширина та довжина ділянки контролю.

Вплив температури враховують у залежності базового вихідного сигналу від компонентного складу палива та температури. Поточний сигнал порівнюють із базовим значенням за відповідних складу й температури, незмінної геометрії ДДП та однакових налаштувань вимірювального каналу СМЯСП.

Третій напрям полягає в узгодженні датчика й вимірювального каналу. Очікуваний діапазон відгуку має відповідати можливостям ЕБ, а параметри з'єднань та алгоритм зчитування повинні бути сталими під час порівняння конструкцій. Вихідний сигнал описують у фактично зареєстрованих одиницях. Перерахунок у фізичну величину виконують за встановленою залежністю; відносна шкала використовується для наочного подання спільного діапазону.

Четвертим напрямом є перевірка інформативності відгуку. Для базових сумішей досліджують вплив частки біопалива, температури та площі електродів. Домішки розглядають як чинники зміни властивостей середовища; висновок про їхній кількісний уміст потребує окремого градування на пробах відомого складу. У програмі дослідження необхідно розрізнити перевірку базової моделі та перевірку реакції на забруднення.

П'ятим напрямом є забезпечення технологічності виготовлення СМЯСП та визначення планових витрат на її встановлення в систему живлення дизельного двигуна. Параметри корпусу, кріплення електродів, ущільнень і приєднувальних елементів мають узгоджуватися з обраною ділянкою паливної

магістралі. Розрахунок витрат охоплює матеріали й комплектувальні вироби, підготовку виготовлення, складання, контроль та встановлення системи.

Придатність вихідного сигналу для моніторингу необхідно оцінювати за інформативністю, чутливістю, стабільністю та однозначністю його інтерпретації. Інформативність характеризує можливість виявляти досліджувані зміни стану палива; чутливість – зміну сигналу на одиницю зміни заданого фактора; стабільність – збереження показів у часі за незмінних умов. Однозначність інтерпретації потребує визначення умов, за яких різні контрольовані стани можна розрізнити за сигналом. Оцінювання цих характеристик має враховувати розсіювання повторних відліків і невизначеність вимірювань.

Критерії подальшого обґрунтування параметрів системи узагальнено в таблиці 1.6. Вони пов'язують кожну групу параметрів із результатом, який можна перевірити розрахунком або вимірюванням.

*Таблиця 1.6*

### **Параметри й критерії обґрунтування СМЯСП**

| <b>Група параметрів</b>              | <b>Показник для порівняння</b>        | <b>Спосіб обґрунтування</b>                                                  |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Площа електродів і відстань між ними | Чутливість, розсіювання показів       | Модель і вимірювання для різних площ; аналіз впливу відстані між електродами |
| Проточна частина                     | Втрата тиску за заданої витрати       | Аналітичний розрахунок і чисельне моделювання втрат тиску                    |
| Температурний режим                  | Відхилення від базової характеристики | Експериментальне визначення базового сигналу за температури 10, 20 і 30 °C   |
| Вимірювальний канал                  | Повторюваність, робочий діапазон      | Повторні відліки та контрольні режими                                        |

| Група параметрів   | Показник для порівняння           | Спосіб обґрунтування                      |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| Корпус і кріплення | Відтворюваність геометрії, монтаж | Креслення, складання та перевірка зразка  |
| Виготовлення       | Собівартість одиниці й партії     | Специфікація, трудомісткість, калькуляція |

Подальші теоретичні й експериментальні дослідження мають кількісно встановити ці характеристики та обґрунтувати вибір параметрів з урахуванням габаритів, об'єму ділянки контролю й витрат виготовлення.

### 1.7 Висновки до розділу 1

За результатами аналізу встановлено, що властивості сумішевого палива визначаються часткою біопалива, характеристиками вихідних компонентів, температурою та умовами зберігання. За наведеними в огляді даними, зі збільшенням частки біопалива від 0 до 100 % густина досліджених зразків зростає від 855,1 до 876,5 кг/м<sup>3</sup>, кінематична в'язкість – від 3,00 до 4,20 мм<sup>2</sup>/с, а показник гігроскопічності – від 255 до 1771 мг/кг. Водночас теплота згоряння зменшується від 45,87 до 40,17 МДж/кг, окиснювальна стабільність – від 357,2 до 32,8 хв. Ці значення характеризують конкретні зразки та умови випробування й засвідчують необхідність урахування компонентного складу під час оцінювання властивостей палива. Основними чинниками погіршення його якості є надходження води й механічних домішок, накопичення продуктів корозії та старіння, мікробіологічне забруднення і потрапляння сторонніх нафтопродуктів. Збільшення частки біопалива саме по собі не означає погіршення якості, тому завдання моніторингу полягає у виявленні відхилень від базового стану палива заданого складу за відповідної температури.

Порівняльний аналіз методів контролю показав доцільність поєднання незалежного лабораторного визначення показників якості з реєстрацією зміни

властивостей палива безпосередньо в паливній магістралі. Для вбудованого моніторингу обґрунтовано застосування датчика діелектричної проникності завдяки відсутності реагентів, можливості проточного виконання та цифрового оброблення сигналу. Водночас вихідний сигнал відображає сукупний вплив компонентного складу, температури, домішок і параметрів вимірювального каналу СМЯСП. Тому його відхилення є ознакою зміни стану палива, а кількісне визначення конкретної домішки потребує окремого градуювання на пробах відомого складу та врахування супутніх чинників. Роздільне оцінювання кількох домішок потребує додаткових незалежних вимірювальних ознак.

За результатами аналізу конструкцій для подальшого дослідження обрано плоскопаралельний ДДП у проточному корпусі, що дає змогу змінювати геометричні параметри електродів та оцінювати їхній вплив на вихідний сигнал. Визначено необхідність узгодження площі електродів, відстані між ними, довжини та ширини ділянки контролю за чутливістю, повторюваністю показів і втратами тиску. Конструкція має забезпечувати незмінність взаємного розташування електродів, повне заповнення міжелектродного проміжку паливом, герметичність та сумісність із паливною магістраллю.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СУМІШЕВОГО ПАЛИВА

Обґрунтування параметрів СМЯСП потребує встановлення зв'язку між властивостями сумішевого палива, геометричними параметрами ДДП та вихідним сигналом вимірювального каналу. Метою теоретичних досліджень є визначення залежностей, які враховують компонентний склад палива, температуру, вплив домішок, площу електродів, відстань між ними і параметри вимірювального каналу СМЯСП. Теоретичні залежності мають забезпечити порівняння конструктивних варіантів ДДП за впливом геометрії електродів на вихідний сигнал та визначення умов застосування СМЯСП у системі живлення дизельного двигуна [100, 102, 105, 116].

Моделювання охоплює послідовне визначення властивостей базової паливної суміші, їх зміни під впливом домішок, електричних параметрів ДДП та формування вихідного сигналу системи. Отримані залежності становлять основу для вибору конструктивних параметрів ДДП, нормування вихідного сигналу та подальшої експериментальної перевірки [104, 121, 128].

Розроблена СМЯСП складається з двох основних складових: ДДП та ЕБ зчитування, оброблення й індикації сигналу. Схему їх електричних з'єднань наведено на рисунку 2.1. ДДП містить два електроди, проміжок між якими заповнюється досліджуваним паливом. До складу ЕБ входять плата Arduino Uno, резистор вимірювального кола опором 1 МОм, LCD-дисплей моделі 1602 з інтерфейсом I<sup>2</sup>C та три світлодіодні індикатори зі струмообмежувальними резисторами опором 220 Ом. Дисплей відображає числовий результат вимірювання, а зелений, жовтий і червоний індикатори позначають діапазони вихідного сигналу відповідно до заданих програмою порогів.

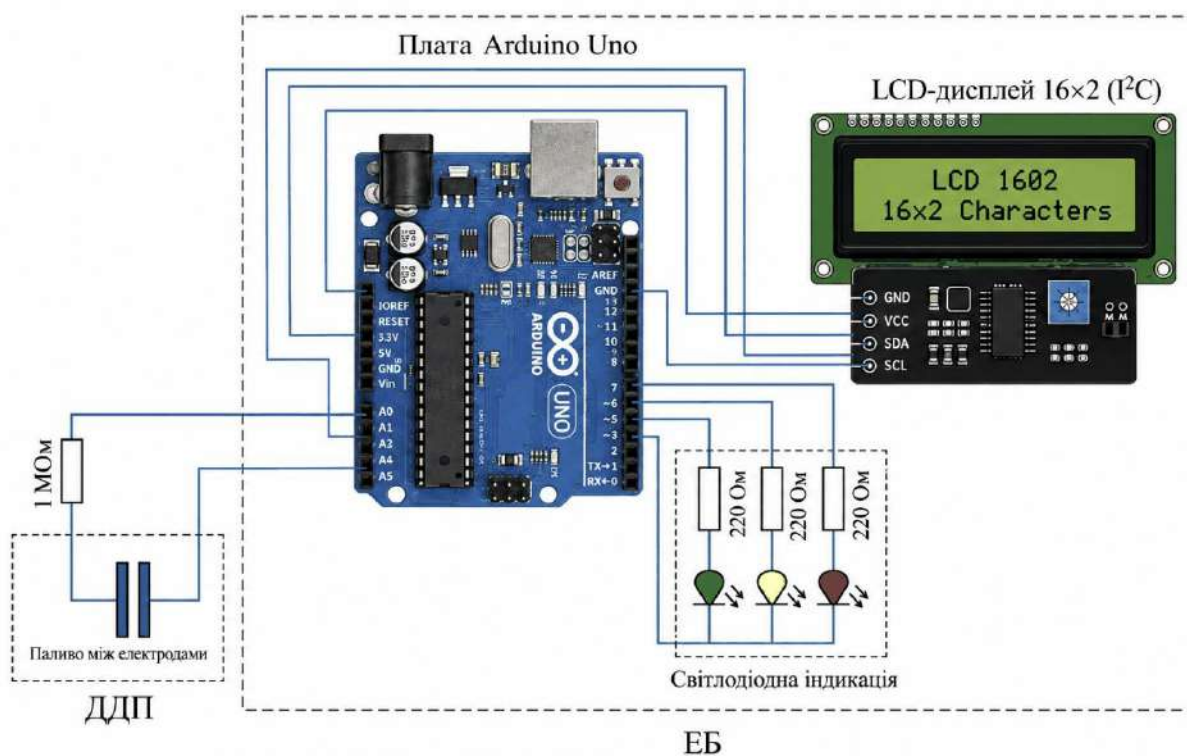


Рисунок 2.1 – Схема електричних з'єднань ДДП та ЕБ СМЯСП

Еквівалентна ємність ДДП разом із резистором вимірювального кола визначає часові характеристики  $RC$ -кола. Зміна електричних властивостей палива між електродами впливає на заряджання й розряджання вимірювального кола та на програмний відлік, який електронний блок реєструє в умовних одиницях. Мікроконтролер плати Arduino Uno керує циклами заряджання й розряджання, виконує програмне зчитування та опрацювання сигналу і забезпечує подання результату в умовних одиницях [121]. Таким чином, подальший теоретичний опис охоплює послідовність перетворень: властивості палива в ділянці контролю  $\rightarrow$  електричні параметри ДДП  $\rightarrow$  вихідний сигнал СМЯСП  $\rightarrow$  нормування та індикація.

Теоретична модель описує формування вихідного сигналу залежно від компонентного складу палива, температури, геометрії електродів і параметрів вимірювального каналу, а також передбачає можливість його зміни під впливом домішок. Експериментальне дослідження спрямовано на визначення базової характеристики системи за зміни частки біопалива, температури та площі електродів.

## 2.1 Сумішеве паливо як багатокомпонентний об'єкт моделювання

У роботі розглянуто суміші дизельного палива нафтового походження та біопалива. Їхній компонентний склад задають об'ємною часткою біопалива  $V$ . Зміна цієї частки означає зміну співвідношення компонентів і сама по собі не свідчить про забруднення палива. На електричні властивості палива та вихідний сигнал СМЯСП також можуть впливати вода, сірковмісні сполуки, механічні та інші шкідливі домішки. У запропонованій моделі окремо враховано характеристики вмісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок [100, 102, 105, 116, 129, 130].

Для теоретичного опису використано набір змінних  $X = (V, T, c_w, c_s, c_m)$ , де  $V$  – об'ємна частка біопалива;  $T$  – температура палива;  $c_w$ ,  $c_s$  і  $c_m$  – характеристики вмісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок відповідно. Спосіб задавання цих характеристик та їх використання в розрахунках наведено в підрозділі 2.3. Базову характеристику вихідного сигналу встановлюють для прийнятих вихідних партій компонентів за заданих  $V$  і  $T$ , незмінної геометрії ДДП та налаштувань зчитування сигналу. Визначення такої характеристики не передбачає, що вихідні компоненти повністю позбавлені домішок.

Поточний сигнал проби  $B50$  порівнюють із базовим сигналом для частки біопалива 50 %, а сигнал проби  $B100$  – із базовим сигналом для частки біопалива 100 %. Порівняння виконують за однакових температури, площі електродів, відстані між ними та налаштувань зчитування сигналу. Це дає змогу врахувати зміну сигналу, пов'язану зі співвідношенням компонентів палива.

У структурному описі (2.1) позначення  $q$  використано для ефективної відносної проникності палива, яка є безрозмірною величиною. Базове значення  $q_0(V, T)$  відповідає паливу з прийнятих вихідних партій компонентів за заданих частки біопалива й температури. Різниця  $\Delta q = q - q_0$  характеризує зміну ефективної відносної проникності проби порівняно з цим базовим значенням.

За невеликих змін умісту домішок зміну ефективної відносної проникності наближено описують лінійною залежністю. Коефіцієнти цієї залежності характеризують зміну проникності зі зміною вмісту відповідної домішки за заданих складу палива й температури. Діапазон застосування такого наближення потребує перевірки за контрольними пробами [103, 131].

Вплив температури враховують порівнянням поточного сигналу з базовим значенням, обчисленим для фактичної температури палива. Компонентний склад проби при цьому має бути заданим або визначеним незалежно. Відхилення поточного сигналу від базового значення може бути пов'язане з відмінностями властивостей проби, наявністю домішок, бульбашок повітря, забрудненням електродів або похибкою вимірювання. Тому саме відхилення сигналу не є достатньою підставою для визначення виду чи концентрації окремої домішки.

Результати досліджень властивостей палива за густиною та в'язкістю показують необхідність задавати температуру під час порівняння проб [132]. У цій моделі температура є незалежним аргументом базової характеристики, а табличні властивості використовуються лише за зазначених умов їх визначення.

Потік палива впливає на однорідність заповнення міжелектродного простору, видалення бульбашок, перенесення частинок і тривалість установлення показу. За повного заповнення міжелектродного проміжку однорідним паливом швидкість потоку не входить безпосередньо до прийнятої електростатичної залежності. Її можливий вплив на вихідний сигнал пов'язують зі зміною умов заповнення, перенесенням бульбашок і частинок та тривалістю заміщення палива. Кількісне оцінювання цього впливу потребує окремого порівняння показів за різних витрат і незмінних складу, температури та геометрії ДДП.

$$q = F(B, T, c_w, c_s, c_m), \quad (2.1)$$

де  $q$  – ефективна відносна проникність контрольованої проби, безрозмірна величина;  $B$  – частка біопалива, %;  $T$  – температура, °C;  $c_w, c_s, c_m$  –

характеристики вмісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок відповідно. Рівняння (2.1) визначає структуру задачі, але не передбачає можливості однозначного відновлення кожного компонента за одним вихідним сигналом СМЯСП.

Структурну схему формування вихідного сигналу СМЯСП наведено на рисунку 2.2.

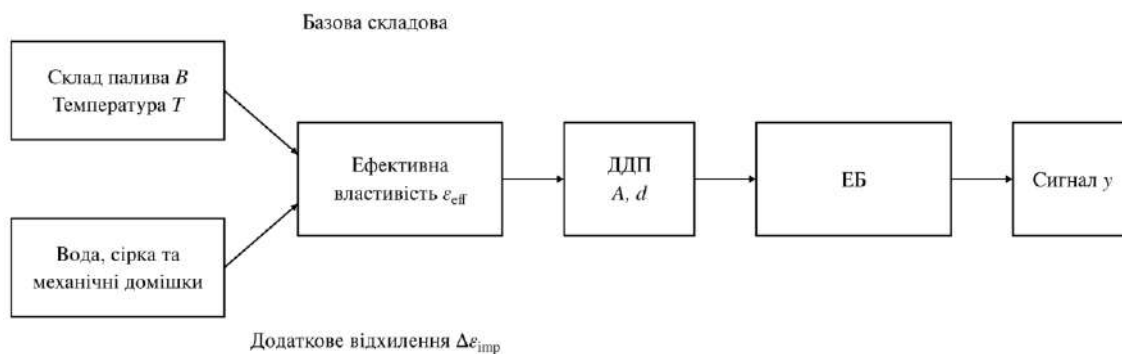


Рисунок 2.2 – Структурна схема формування вихідного сигналу СМЯСП

## 2.2 Теоретичний опис властивостей базової паливної суміші

Для кількісного опису взаємодії палива з електричним полем використано відносну діелектричну проникність  $\epsilon_r$ , яка характеризує поляризаційну здатність середовища. У квазістатичному наближенні електрична індукція  $D$  пропорційна напруженості поля  $E$ . Саме цей зв'язок становить фізичну основу зміни ємності датчика при зміні компонентного складу контрольованого палива [100, 104, 116].

Для опису залежності відносної проникності сумішевого палива від частки біопалива використано лінійну залежність із додатковим квадратичним членом  $\gamma_{\text{в}}b(1-b)$ . Цей член враховує відхилення проникності суміші від значення, обчисленого за лінійним правилом змішування. Коефіцієнт  $\gamma_{\text{в}}$  необхідно визначати за даними про проникність досліджуваних паливних сумішей.

Температурну залежність у діапазоні 10–30 °С подано поліномом другого порядку відносно опорної температури  $T_0 = 20$  °С.

Залежність  $\varepsilon_b(B, T)$  описує розрахункову відносну проникність палива, приготовленого з прийнятих вихідних компонентів, за заданих частки біопалива й температури. Її використовують як значення для порівняння з ефективною відотною проникністю проби, що має інший уміст домішок.

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E, \quad (2.2)$$

де  $D$  – електрична індукція, Кл/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала;  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність;  $E$  – напруженість електричного поля, В/м.

$$\varepsilon_b(B, T_0) = (1 - b)\varepsilon_D + b\varepsilon_F + \gamma_B b(1 - b), \quad (2.3)$$

де  $b$  – об’ємна частка біопалива у частках одиниці;  $\varepsilon_D$  та  $\varepsilon_F$  – відносні діелектричні проникності ДП нафтового походження та біопалива за опорної температури  $T_0$  відповідно;  $\gamma_B$  – коефіцієнт, що характеризує відхилення проникності суміші від лінійної залежності від частки біопалива.

$$\varepsilon_b(B, T) = \varepsilon_b(B, T_0) + \alpha_T(B)(T - T_0) + \beta_T(B)(T - T_0)^2, \quad (2.4)$$

де  $\alpha_T(B)$  і  $\beta_T(B)$  – температурні коефіцієнти для відповідного складу;  $T_0 = 20$  °С – опорна температура. Залежність коефіцієнтів від  $B$  допускає різний температурний нахил для B0, B50 та B100.

Для узгодження подальших залежностей основні параметри моделі та їх функціональне призначення систематизовано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

### Роль основних змінних у теоретичній моделі

| Змінна | Фізичний зміст                       |
|--------|--------------------------------------|
| $B$    | Частка біопалива у сумішевому паливі |
| $T$    | Температура контрольованої проби     |
| $A$    | Площа електродів ДДП                 |
| $d$    | Відстань між електродами ДДП         |

Змінні  $B$ ,  $T$ ,  $A$  та  $d$  утворюють систему параметрів, що пов'язує властивості контрольованого середовища з геометрією електродів ДДП й визначає базовий рівень вихідного сигналу.

### **2.3 Теоретичне врахування води, сірковмісних сполук і механічних домішок**

Домішки впливають на сигнал за різними фізичними механізмами. Вода має значно вищу полярність порівняно з вуглеводневим середовищем, однак характер її впливу залежить від розчиненого, емульгованого або вільного стану [103, 110, 111, 122]. Механічні частинки локально спотворюють поле, можуть осідати на електродах і спричиняти нестабільність відгуку [128]. Сірковмісні сполуки утворюють різномірну групу, тому масовий вміст сірки не задає однозначної електрофізичної властивості без урахування хімічної форми сполук [133]. За наявності іонної провідності слід урахувати, що взаємодії між іонами можуть змінювати зв'язок між їхньою рухливістю та електропровідністю [134].

Для наближеного розрахунку ефективної відносної проникності палива з розподіленими в ньому краплями води або твердими частинками використано модель Лоойенги. У цій моделі краплі та частинки розглядають як включення, для яких задають відносну проникність і об'ємну частку. Прийнято, що включення розподілені в контрольованому об'ємі палива приблизно рівномірно [131].

За невеликих змін умісту домішок зміну ефективної відносної проникності палива наближено подають як суму внесків води, сірковмісних сполук і механічних домішок. Коефіцієнти  $k_w$ ,  $k_s$  і  $k_m$  характеризують зміну проникності зі зміною вмісту відповідної домішки за незмінних частки біопалива й температури. Для кількісного застосування цієї залежності коефіцієнти та межі її придатності необхідно визначити за контрольними пробами з відомим умістом домішок.

Коефіцієнти впливу домішок залежать від компонентного складу палива, температури та властивостей внесених речовин. Значення, визначені для одного складу палива й заданих умов вимірювання, потребують перевірки перед застосуванням до інших паливних сумішей.

СМЯСП реєструє один вихідний сигнал, на який можуть одночасно впливати кілька домішок [135].

Для кількісного опису переходу від базової характеристики (2.4) до властивостей палива з дисперсними включеннями застосовано модель ефективного середовища. Відповідно до моделі Лоойенги кубічний корінь з ефективної проникності визначається адитивним внеском базового середовища та включень [131]:

$$\sqrt[3]{\varepsilon_{\text{eff}}} = (1 - \varphi)\sqrt[3]{\varepsilon_b} + \varphi\sqrt[3]{\varepsilon_i}, \quad (2.5)$$

де  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – ефективна відносна проникність;  $\varepsilon_b$  – базова проникність палива;  $\varepsilon_i$  – проникність включень;  $\varphi$  – їх об’ємна частка.

$$\varphi_i \approx c_i \cdot 10^{-6} \frac{\rho_b}{\rho_i}, \quad (2.6)$$

де  $c_i$  – масовий вміст і-го компонента, мг/кг;  $\rho_b$  і  $\rho_i$  – густини базового палива та домішки, кг/м<sup>3</sup>.

$$\Delta\varepsilon_{\text{imp}} \approx k_w c_w + k_s c_s + k_m c_m, \quad (2.7)$$

де  $\Delta\varepsilon_{\text{imp}}$  – розрахунковий приріст ефективної проникності під дією сукупності досліджуваних домішок;  $k_w$ ,  $k_s$  і  $k_m$  – локальні коефіцієнти впливу води, сірковмісних сполук і механічних домішок;  $c_w$ ,  $c_s$  і  $c_m$  – відповідні характеристики їх вмісту.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_b(B, T) + \Delta\varepsilon_{\text{imp}}, \quad (2.8)$$

де  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – ефективна проникність поточної проби;  $\varepsilon_b(B, T)$  – базова проникність палива заданого компонентного складу за фактичної температури;  $\Delta\varepsilon_{\text{imp}}$  – додатковий внесок небажаних компонентів.

Рівняння (2.7)–(2.8) є локальною адитивною апроксимацією. Її застосування обмежене малою концентрацією, відсутністю поділу палива та

домішок на окремі шари і стабільним розподілом домішки. За взаємодії компонентів до моделі потрібно додати члени  $k_{wm}c_w c_m$ ,  $k_{ws}c_w c_s$  та інші взаємодії.

$$\Delta \varepsilon = Kc, \quad K = [k_w \quad k_s \quad k_m], \quad c = [c_w \quad c_s \quad c_m]^T, \quad (2.9)$$

де  $\Delta \varepsilon$  – спостережуване відхилення проникності від базового стану;  $K$  – рядок коефіцієнтів чутливості;  $c$  – вектор характеристик вмісту небажаних компонентів; верхній індекс  $T$  означає транспонування вектора.

Матриця  $K$  у рівнянні (2.9) має один рядок, тому її ранг не перевищує одиниці. Вектор  $c$  містить три компоненти.

Розрахункову зміну ефективної проникності за моделлю Лоойенги наведено на рисунку 2.3.

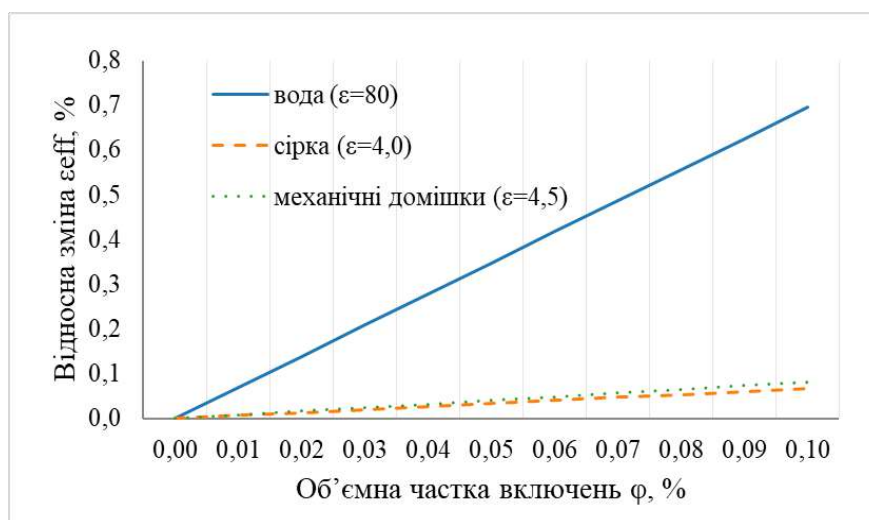


Рисунок 2.3 – Розрахункова зміна ефективної проникності за моделлю Лоойенги

Фізичні механізми впливу трьох досліджуваних домішок і межі їх одноканального оцінювання узагальнено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

### Роль домішок у теоретичній моделі

| Чинник              | Можливий механізм впливу       |
|---------------------|--------------------------------|
| Вода                | Поляризація, зміна провідності |
| Сірковмісні сполуки | Зміна провідності              |
| Механічні домішки   | Зміна провідності              |

Кількісне оцінювання вмісту окремої домішки потребує спеціального градування за фіксованих або незалежно відомих супутніх чинників [136].

## 2.4 Обґрунтування геометричних параметрів датчика

ДДП складається з двох плоскопаралельних вимірювальних електродів, між якими розміщується контрольований об'єм палива. У першому наближенні його подано плоскопаралельною системою. За такої ідеалізації ємність прямо пропорційна площі електродів  $A$  та відносній проникності середовища й обернено пропорційна відстані  $d$  між електродами ДДП [104, 121, 128].

Ідеалізована формула не враховує крайове поле, товщину електродів, форму підвідних провідників, стінки корпусу та неоднорідність заповнення. Ці чинники зводяться до геометричного коефіцієнта  $k_g$  та паразитної ємності  $C_p$ . Якщо відношення відстані  $d$  між електродами до характерного лінійного розміру електрода не є малим, крайовий внесок може бути помітним, тому остаточний коефіцієнт перетворення необхідно визначати градуванням готового засобу [137].

Збільшення площі електродів підвищує абсолютну зміну ємності за однакової зміни властивостей палива.

Для порівняння конструкцій прийнято ширину електродів 10 мм і довжину вздовж потоку 5, 10 та 15 мм, що відповідає площам 0,5; 1,0 та 1,5 см<sup>2</sup>. Відстань між електродами становить 3 мм, товщина електродів – 1,5 мм.

Моделювання розподілу електричного поля між електродами датчика виконували в COMSOL Multiphysics.

$$C_{el} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}} \frac{A}{d}, \quad (2.10)$$

де  $C_{el}$  – розрахункова ємність ідеалізованого датчика, Ф;  $\varepsilon_0$  – електрична стала, Ф/м;  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – ефективна відносна діелектрична проникність палива;  $A$  – площа електродів, м<sup>2</sup>;  $d$  – відстань між електродами, м.

$$C_x = C_p + k_g \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}} \frac{A}{d}, \quad (2.11)$$

де  $C_x$  – еквівалентна вхідна ємність каналу, Ф;  $C_p$  – паразитна ємність монтажу, Ф;  $k_g$  – безрозмірний геометричний коефіцієнт, що узагальнює крайові ефекти й відхилення реальної конструкції від плоскопаралельної моделі; інші позначення відповідають рівнянню (2.10).

$$\frac{\partial C_x}{\partial \varepsilon_{\text{eff}}} = k_g \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (2.12)$$

де похідна еквівалентної ємності  $C_x$  за ефективною проникністю  $\varepsilon_{\text{eff}}$  визначає геометричну чутливість;  $k_g$  – геометричний коефіцієнт;  $\varepsilon_0$  – електрична стала;  $A$  – площа електродів;  $d$  – відстань між електродами. З рівняння (2.12) випливає, що відношення площі електродів до відстані між ними є основним конструктивним множником. Для реального датчика  $k_g$  та  $C_p$  оцінюють разом з вимірювальним каналом СМЯСП, оскільки їх роздільне визначення не є обов'язковим для алгоритму моніторингу.

Для порівняння розподілу електричного поля для трьох варіантів площі електродів виконано тривимірне чисельне моделювання в програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Електроди прийнято ідеальними провідниками, паливо – однорідним із відносною проникністю 2,20. Потенціал і напруженість визначають за співвідношеннями (2.13).

$$\nabla^2 \varphi = 0; \quad E = -\nabla \varphi, \quad (2.13)$$

де  $\varphi$  – електричний потенціал, В;  $E$  – вектор напруженості електричного поля, В/м;  $\nabla$  – оператор просторового диференціювання. На електродах задано потенціали +0,5 і −0,5 В, тобто нормувальну різницю потенціалів  $U_0 = 1$  В. Це умова порівняльного розрахунку, а не заміна напруги живлення ЕБ 5 В. На зовнішній межі області  $30 \times 30 \times 18$  мм задано  $\varphi = 0$ . Для всіх геометрій використано однакові граничні умови та крок сітки 0,125 мм. Систему дискретних рівнянь розв'язано методом спряжених градієнтів із відносною

нев'язкою меншою за  $10^{-9}$ . Результати у поздовжньому перерізі наведено на рисунку 2.4.

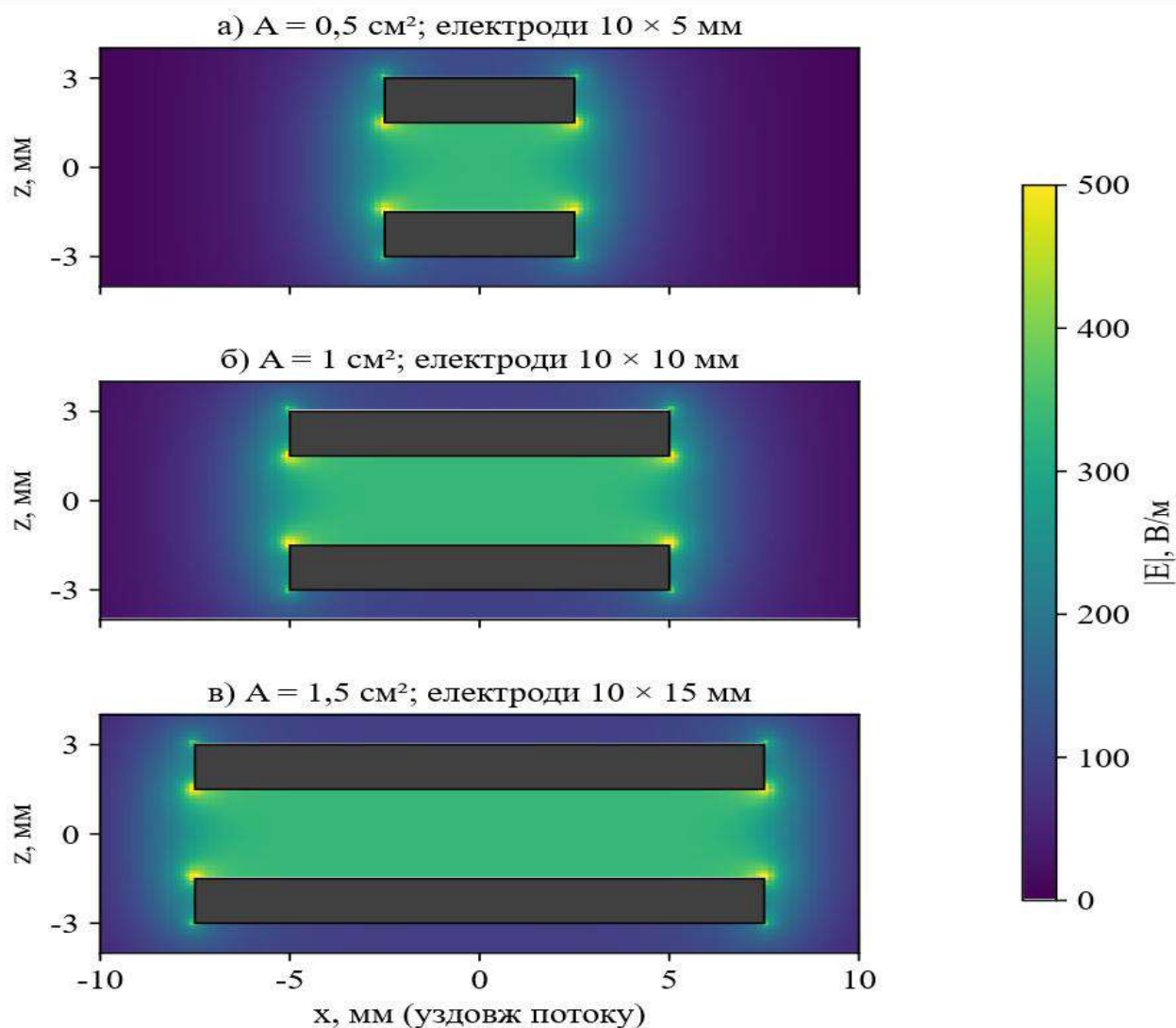


Рисунок 2.4 – Розрахунковий розподіл напруженості електричного поля у поздовжньому перерізі датчика: а –  $0,5 \text{ см}^2$ ; б –  $1,0 \text{ см}^2$ ; в –  $1,5 \text{ см}^2$ ;  $d = 3 \text{ мм}$ ,  $U_0 = 1 \text{ В}$

У центральній частині міжелектродного проміжку формується область відносно рівномірного поля, а поблизу торців виникають крайові зміни. Збільшення довжини електродів розширює центральну область. Для зіставлення геометрій на рисунку 2.5 наведено профілі модуля напруженості вздовж потоку при  $y = 0$  і  $z = 0$ ; координату  $x$  віднесено до довжини  $L$  відповідного електрода, а напруженість – до  $U_0/d$ .

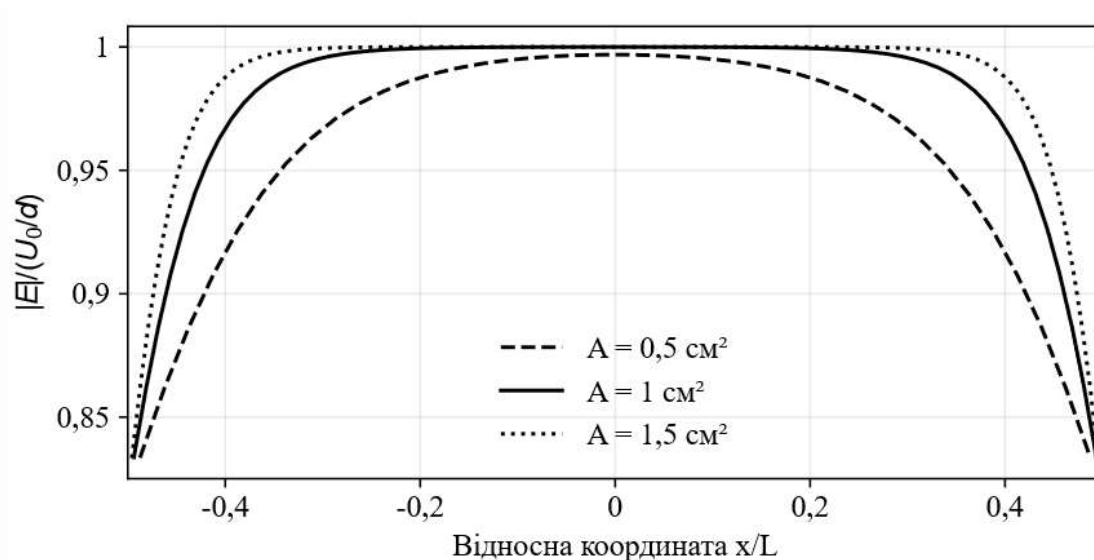


Рисунок 2.5 – Порівняння профілів напруженості електричного поля в середині міжелектродного проміжку для трьох площ електродів

Неоднорідність поля характеризують коефіцієнтом варіації модуля напруженості в серединному перерізі  $z = 0$  у межах проєкції електродів. Для всіх варіантів показник обчислюють за однаковим правилом (2.14).

$$k_E = \frac{\sigma_E}{E_{\text{сер}}} \cdot 100 \%, \quad (2.14)$$

де  $k_E$  – коефіцієнт варіації модуля напруженості в заданому перерізі, %;  $\sigma_E$  – просторове стандартне відхилення, В/м;  $E_{\text{сер}}$  – середній модуль напруженості, В/м. Порівняння геометрії та розрахункових електричних характеристик за  $d = 3$  мм і відносної проникності 2,20 наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

**Порівняння геометрії та розрахункових електричних характеристик за  $d = 3$  мм і відносної проникності 2,20**

| $A, \text{см}^2$ | Розміри, мм    | $C_{el}, \text{пФ}$ | $V_p, \text{мл}$ | $E_{\text{сер}}, \text{В/м}$ | $k_E, \%$ |
|------------------|----------------|---------------------|------------------|------------------------------|-----------|
| 0,5              | $10 \times 5$  | 0,325               | 0,15             | 311,2                        | 6,94      |
| 1,0              | $10 \times 10$ | 0,649               | 0,30             | 318,7                        | 6,08      |
| 1,5              | $10 \times 15$ | 0,974               | 0,45             | 321,2                        | 5,59      |

Ємності в таблиці 2.3 визначено за формулою (2.10), а характеристики поля – чисельним розрахунком. Відношення  $A/d$  дорівнюють 1,67; 3,33 і 5,00 см відповідно. Чисельні значення  $k_E$  показують поступове зменшення неоднорідності зі збільшенням площі; окремого мінімуму при 1,0 см<sup>2</sup> не встановлено.

Для площі 1,0 см<sup>2</sup> перевірено кроки сітки 0,5; 0,25 і 0,125 мм. Середній модуль напруженості становив відповідно 321,89; 319,60 і 318,72 В/м, а  $k_E$  – 4,55; 5,68 і 6,08 %. При останньому уточненні середнє значення змінилося на 0,28 %, а коефіцієнт варіації – на 0,41. Збільшення області до 40 × 40 × 24 мм за кроку 0,25 мм дало 319,75 В/м і 5,61 %.

Розрахункову залежність ємності ДДП від площі електродів і відстані між ними показано на рисунку 2.6.

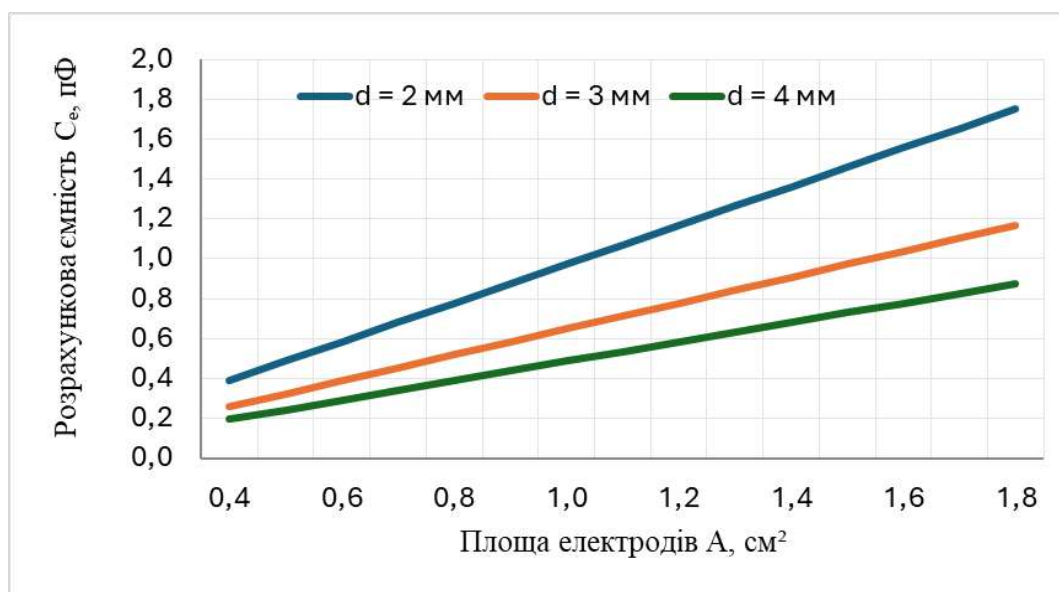


Рисунок 2.6 – Розрахункова залежність ємності датчика від площі електродів і відстані між ними

$$V_k = A d, \quad (2.15)$$

де  $V_k$  – активний об'єм палива між електродами, м<sup>3</sup>. За площі електродів 1,0 см<sup>2</sup> та відстані між ними 3 мм він становить 0,30 мл. Повний внутрішній об'єм проточної частини додатково охоплює вхідну, вихідну та перехідні ділянки.

Конструктивне виконання ДДП має забезпечувати не лише необхідну чутливість до зміни властивостей сумішевого палива, а й можливість установлення датчика в паливній магістралі дизельного двигуна. Тому під час вибору його параметрів необхідно враховувати площу електродів, відстань між ними та поперечний переріз проточного каналу [138].

Запропонована конструкція містить корпус із вхідним і вихідним приєднувальними каналами та розташовану між ними ділянку контролю. У межах цієї ділянки встановлено електроди ДДП, між якими проходить контрольоване сумішеве паливо. Плавна зміна поперечного перерізу на вході та виході ділянки контролю сприяє рівномірному заповненню міжелектродного проміжку ДДП.

Конструктивну модель проточної частини ДДП наведено на рисунку 2.7.

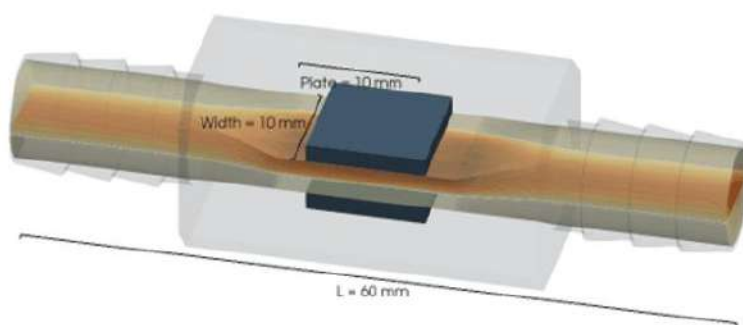


Рисунок 2.7 – Конструктивна модель проточної частини ДДП

Середню швидкість руху сумішевого палива у ділянці контролю визначають із рівняння нерозривності потоку:

$$v = \frac{Q}{S_k}, \quad (2.16)$$

де  $v$  – середня швидкість руху сумішевого палива у ділянці контролю, м/с;  $Q$  – об’ємна витрата палива, м³/с;  $S_k$  – площа поперечного перерізу проточного каналу, м². Зменшення площі перерізу за незмінної витрати супроводжується збільшенням швидкості потоку

Для каналу некруглого поперечного перерізу характерний розмір доцільно визначати через гідравлічний діаметр:

$$D_{\Gamma} = \frac{4S_{\kappa}}{P_{\text{зм}}}, \quad (2.17)$$

де  $D_{\Gamma}$  – гідравлічний діаметр каналу, м;  $P_{\text{зм}}$  – змочений периметр його поперечного перерізу, м.

Загальні втрати тиску в датчику можна подати як суму втрат уздовж каналу та місцевих втрат у зонах розширення, звуження і приєднання:

$$\Delta p_{\text{д}} = \left( \lambda \frac{L}{D_{\Gamma}} + \sum_i \zeta_i \right) \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2.18)$$

де  $\Delta p_{\text{д}}$  – втрата тиску в проточній частині датчика, Па;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;  $L$  – довжина проточного каналу, м;  $\zeta_i$  – коефіцієнт  $i$ -го місцевого опору;  $\rho$  – густина сумішевого палива, кг/м<sup>3</sup>. Умова придатності датчика до встановлення в паливній магістралі полягає в тому, що створювані ним втрати тиску не повинні перевищувати допустимого значення:

$$\Delta p_{\text{д}} \leq \Delta p_{\text{доп}}, \quad (2.19)$$

де  $\Delta p_{\text{доп}}$  – допустиме зниження тиску в контрольованій ділянці паливної магістралі, Па.

Допустимий перепад тиску встановлюють для конкретної системи живлення з урахуванням вимог до тиску на вході паливної апаратури та втрат в інших елементах магістралі. Порівняння втрат у ДДП лише з номінальним тиском системи не замінює перевірки умови (2.19). Розрахунок виконують за витратою палива через місце встановлення датчика.

Розрахункову тривалість заміщення активного об'єму палива між електродами визначають за співвідношенням:

$$t_{\text{з}} = \frac{V_{\kappa}}{Q}, \quad (2.20)$$

де  $t_{\text{з}}$  – теоретична тривалість заміщення контрольованого об'єму, с;  $V_{\kappa}$  – активний об'єм палива між електродами, м<sup>3</sup>.

Для збереження відтворюваності вимірювання конструкція корпусу повинна забезпечувати сталість площі електродів  $A$  та відстані  $d$  між ними.

Деформація корпусу, зміщення електродів або послаблення їх кріплення змінюють відношення  $A/d$ , а отже, еквівалентну ємність  $C_x$  і вихідний сигнал СМЯСП.

Таким чином, геометричні параметри датчика визначають еквівалентну ємність вимірювального каналу та його чутливість до зміни властивостей контрольованого палива. Однак безпосереднім результатом роботи системи є не розрахункова ємність, а сформований електронним і програмним каналами вихідний сигнал.

## 2.5 Формування вихідного сигналу та врахування температури

Еквівалентне коло вимірювального каналу містить резистор  $R$  та еквівалентну вхідну ємність  $C_x$ , яка відповідно до формули (2.11) враховує ДДП і паразитні складові монтажу. У прийнятому  $RC$ -наближенні напруга під час заряджання змінюється експоненціально, а стала часу становить  $\tau = RC_x$ . Мікроконтролер формує програмний відлік, пов'язаний із перебігом перехідного процесу за заданих налаштувань зчитування.

Бібліотека `CapacitiveSensor` не повертає сталу часу  $\tau$  безпосередньо. Алгоритм виконує послідовність заряджання, розряджання та перевірок логічного стану, а значення вихідного сигналу залежить від кількості внутрішніх зчитувань, швидкодії мікроконтролера, порогів цифрового входу, опору резистора, параметрів монтажу та програмної реалізації. Вихідний сигнал СМЯСП позначено  $\mathcal{U}$  і подано в умовних одиницях; його перехід до фізичної величини можливий лише за окремою градуовальною характеристикою [125].

Параметр `capacitiveSensor( $N_s$ )` задає кількість внутрішніх зчитувань, накопичених для одного поверненого значення.  $N_s$  не є кількістю секунд і не перетворюється в час простим множенням на  $\tau$ . Фактичну тривалість отримання одного значення або серії потрібно вимірювати функцією `micros()/millis()` чи зовнішнім таймером.

Для кожного режиму за незмінних  $B$ ,  $T$  та  $A$  реєструють серію повторних програмних відліків. Один відлік формується за заданої кількості внутрішніх циклів зчитування. Зовнішнє усереднення виконують для окремо отриманих відліків; у реалізації додатка Б поточний сигнал визначають як середнє п'яти відліків.

Модель формування вихідного сигналу СМЯСП будуємо як монотонну функцію еквівалентної ємності. У вузькому діапазоні її можна лінеаризувати. Якщо залишки лінійного градування мають систематичну кривизну, застосовується квадратична функція.

$$u(t) = U \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right) \right], \quad \tau = RC_x, \quad (2.21)$$

де  $u(t)$  – миттєва напруга на еквівалентній ємності, В;  $U$  – напруга усталеного стану, В;  $t$  – час, с;  $\tau$  – стала часу, с;  $R$  – опір вимірювального резистора, Ом;  $C_x$  – еквівалентна входна ємність, Ф.

$$y = y_{\text{off}} + K_y C_x + e, \quad (2.22)$$

де  $y$  – вихідний сигнал СМЯСП, ум. од.;  $y_{\text{off}}$  – базова складова алгоритму і монтажу;  $K_y$  – коефіцієнт перетворення, ум. од./Ф;  $e$  – випадкова та неврахована складова.

$$y = y_p + K_A \varepsilon_{\text{eff}} + e, \quad K_A = K_y k_g \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (2.23)$$

де  $y_p$  – складова вихідного сигналу, що не залежить від властивостей проби;  $K_A$  – узагальнений коефіцієнт перетворення;  $K_y$  – коефіцієнт вимірювального каналу СМЯСП;  $k_g$  – геометричний коефіцієнт;  $\varepsilon_0$ ,  $A$  і  $d$  мають значення, наведені після рівняння (2.10).

Після підстановки (2.8) у (2.23) одержано розділення базового сигналу та додаткового внеску домішок.

$$y = y_p + K_A \varepsilon_b(B, T) + K_A \Delta \varepsilon_{\text{imp}} + e, \quad (2.24)$$

де перші два доданки формують базовий сигнал для заданих  $B$ ,  $T$  і  $A$ ; третій доданок характеризує розрахунковий внесок небажаних компонентів;  $e$  – залишкова складова моделі.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \quad (2.25)$$

де  $\bar{y}$  – середнє арифметичне значення вихідного сигналу, ум. од.;  $n$  – кількість незалежних повторних відліків;  $y_j$  –  $j$ -те значення вихідного сигналу.

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n - 1}}, \quad CV = 100 \frac{s_y}{\bar{y}}, \quad (2.26)$$

де  $s_y$  – вибіркове стандартне відхилення сигналу, ум. од.;  $CV$  – коефіцієнт варіації, %;  $n$ ,  $y_j$  і  $\bar{y}$  визначені після рівняння (2.25). Якщо середній сигнал наближається до нуля, коефіцієнт варіації втрачає інформативність, тому додатково подають  $s_y$  та довірчий інтервал [139].

Для однозначного трактування часових характеристик, параметрів алгоритму та вихідного сигналу їх позначення, одиниці й способи визначення наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

#### Розмежування часових характеристик вихідного сигналу

| Величина                       | Позначення | Одиниця |
|--------------------------------|------------|---------|
| Стала часу еквівалентного кола | $\tau$     | с       |
| Вихідний сигнал СМЯСП          | $y$        | ум. од. |
| Кількість внутрішніх зчитувань | $N_s$      | шт.     |
| Кількість незалежних повторень | $n$        | шт.     |
| Тривалість серії               | $t_{ser}$  | с       |

Температура визначає властивості паливного середовища, а площа електродів і відстань між ними – геометричний множник перетворення цих

властивостей у сигнал. Тому базову характеристику задають для відповідного компонентного складу, температури та конструкції ДДП за незмінних налаштувань вимірювального каналу СМЯСП [100, 102, 116, 121].

Для фіксованого складу й площі базова температурна характеристика може бути апроксимована поліномом другого порядку. У загальному теоретичному виразі допускаємо взаємодії  $B \times T$ ,  $B \times A$  і  $T \times A$ .

Поточний вихідний сигнал СМЯСП порівнюють із базовим значенням для відповідної частки біопалива й температури за незмінної геометрії ДДП та однакових налаштувань вимірювального каналу.

Геометричні характеристики та розподіл електричного поля для трьох варіантів ДДП порівняно в підрозділі 2.4. Їх подальше експериментальне дослідження є основою для обґрунтування площі електродів.

$$y_b(B, T, A) = f(B, T) g\left(\frac{A}{d}\right) + y_p, \quad (2.27)$$

де  $y_b(B, T, A)$  – базовий вихідний сигнал СМЯСП, ум. од.;  $f(B, T) = \varepsilon_b(B, T)$  – базова відносна проникність палива, безрозмірна величина;  $g(A/d) = K_y k_g \varepsilon_0 A/d$  – коефіцієнт перетворення проникності у вихідний сигнал, ум. од., відповідно до формули (2.23);  $y_p$  – стала складова вихідного сигналу, ум. од. Значення  $f(B, T)$  визначається часткою біопалива та температурою, а множник  $g(A/d)$  – геометрією електродів і параметрами вимірювального каналу СМЯСП.

За невідомого компонентного складу відхилення сигналу не можна однозначно пов'язувати з наявністю домішок.

$$\Delta y = y_{\text{meas}} - \hat{y}_b(B, T, A), \quad (2.28)$$

де  $y_{\text{meas}}$  – поточний усереднений сигнал;  $\hat{y}_b(B, T, A)$  – прогноз базового сигналу для того самого складу, температури та площі;  $\Delta y$  – залишкове відхилення, яке може бути спричинене досліджуваними домішками.

$$S_{T,A} = \frac{|\partial y / \partial \varepsilon_{\text{eff}}|}{s_y} = \frac{|K_A|}{s_y}, \quad (2.29)$$

де  $S_{T,A}$  – чутливість вихідного сигналу до зміни ефективної відносної проникності, віднесена до стандартного відхилення повторних відліків;  $S_y$  – стандартне відхилення сигналу, ум. од.

Для апроксимації базового сигналу доцільно застосувати поліноміальну структуру, що містить лінійні та квадратичні складові, а також парні взаємодії компонентного складу, температури й площі електродів.

## 2.6 Обґрунтування використання умовних одиниць вимірювання вихідного сигналу

Залежність ємності датчика від властивостей палива, площі електродів і відстані між ними наведено у формулі (2.10). Параметри вимірювального каналу враховано у формулах (2.11), (2.22)–(2.24).

Бібліотека CapacitiveSensor повертає програмний відлік в умовних одиницях, пов'язаний із тривалістю заряджання й розряджання вимірювального кола. Відлік залежить також від порогів цифрових входів, кількості зчитувань і параметрів мікроконтролера.

Принцип формування відліку засобами бібліотеки CapacitiveSensor проілюстровано на рисунку 2.8.

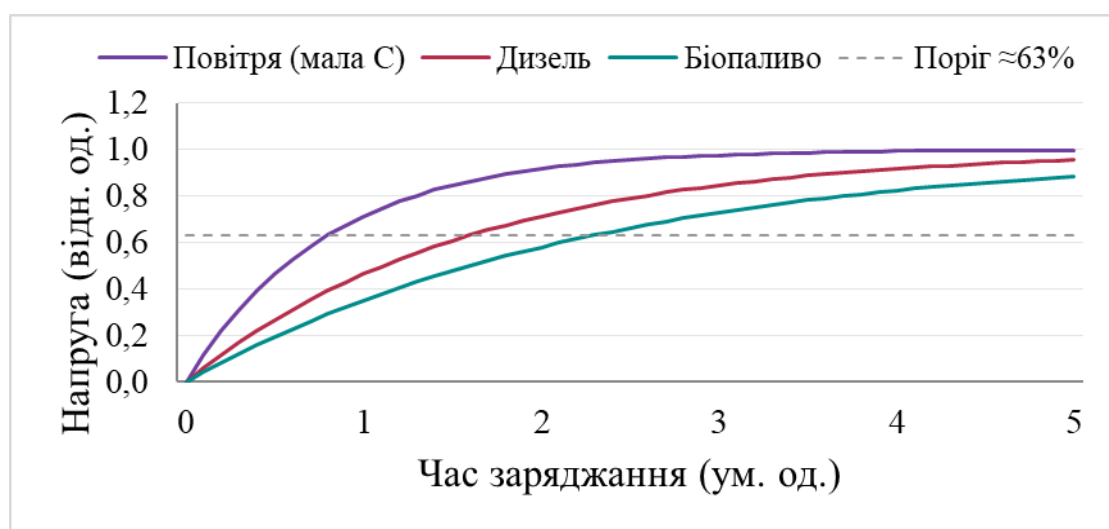


Рисунок 2.8 – Принцип роботи CapacitiveSensor: час досягнення порогу пропорційний ємності

Метод `capacitiveSensor(30)` повертає результат серії з 30 внутрішніх зчитувань з урахуванням базового рівня бібліотеки. Метод `capacitiveSensorRaw(30)` повертає відлік без такого віднімання. У повній реалізації програми в додатку Б використано `capacitiveSensorRaw(30)`, щоб окремо задавати й зберігати опорні значення.

У програмній реалізації додатка Б один відлік  $v_j$  отримують викликом `capacitiveSensorRaw(30)`, який передбачає 30 внутрішніх зчитувань. Середнє п'яти таких відліків утворює поточний вихідний сигнал `raw` в умовних одиницях. У методиці експерименту зареєстровані значення вихідного сигналу позначають  $U_i$ , а середнє повторних вимірювань за незмінних умов –  $\bar{U}$ . Програмне усереднення відліків та статистичне усереднення повторних вимірювань є окремими операціями.

$$raw = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 v_j \quad (2.30)$$

Це значення виводиться на LCD і в Serial-монітор як «Raw: ...». Основні чинники, що впливають на усереднений первинний сигнал СМЯСП, наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

#### Чинники впливу на усереднений первинний сигнал СМЯСП

| Фактор                             | Вплив на raw                                                    |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Параметр <code>samples (30)</code> | Збільшення <code>samples</code> збільшує абсолютне значення raw |
| Довжина дротів                     | Паразитна ємність змінює raw                                    |
| Напруга живлення Arduino           | Впливає на швидкість заряджання                                 |
| Опір між пінами                    | Змінює постійну часу $RC$                                       |
| Температура мікросхеми             | Дрейф показів                                                   |

Вихідний сигнал подають в умовних одиницях, оскільки електронний блок формує програмний відлік без його перерахунку у значення проникності або концентрації домішок. Порівняння таких відліків виконують за незмінних налаштувань зчитування сигналу.

Базовий відлік у повітрі  $RAW\_BASE$  визначають як середнє 20 відліків  $v_{air,j}$  для порожнього, очищеного та сухого датчика:

$$RAW_{BASE} = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} v_{air,j} \quad (2.31)$$

Для початкового калібрування обрано повітря як середовище з відтворюваними за однакових умов діелектричними властивостями, оскільки різні палива можуть зумовлювати різні базові значення вихідного сигналу СМЯСП. Надалі ці пороги залишаються фіксованими незалежно від збільшення або зменшення сигналу базового палива.

$$cleanOn = RAW_{BASE} \cdot (1 + 0,20) // +20\% \quad (2.32)$$

$$warnOn = RAW_{BASE} \cdot (1 + 0,50) // +50\% \quad (2.33)$$

Пороги перевищення повітряної бази на 20 і 50 % використовуємо для роботи індикаційного каналу.

Принцип установлення порогів індикації відносно повітряної бази показано на рисунку 2.9.

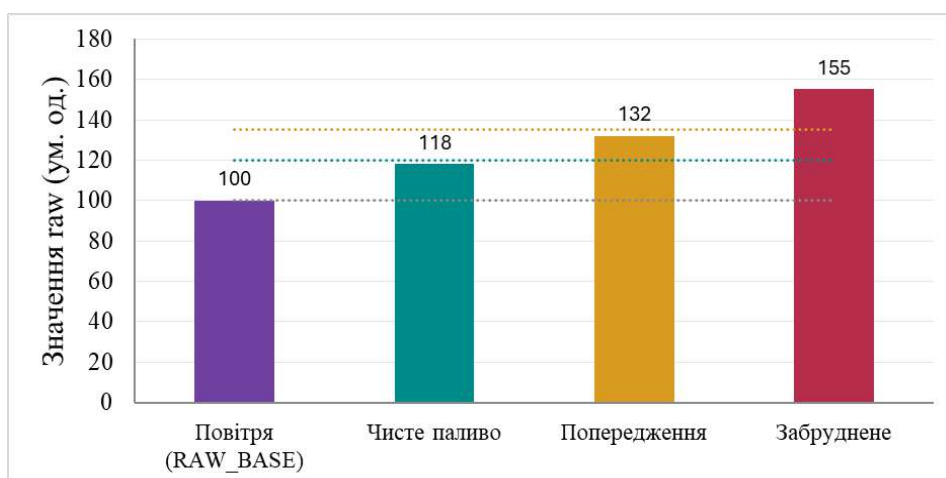


Рисунок 2.9 – Принцип установлення порогів індикації відносно повітряної бази

Гістерезис  $HYST = 0,05$  задає різницю порогів увімкнення та вимкнення індикації, що дорівнює 5 % базового сигналу, і зменшує часті перемикання поблизу меж діапазонів.

Приклад програмної реалізації зчитування, усереднення, нормування, оброблення помилок та індикації сигналу наведено в додатку Б.

Сигнал RAW є усередненим програмним відліком в умовних одиницях.

Подання сигналу в умовних одиницях дає змогу порівнювати результати досліджень за незмінних налаштувань вимірювального каналу СМЯСП, однакового алгоритму зчитування та спільних опорних значень нормування. Оцінювання впливу компонентного складу, температури й площі електродів виконують за зміною сигналу з урахуванням розсіювання повторних відліків. Перехід до значень проникності або вмісту окремої домішки потребує відповідного градуювання.

$$I = 1 + 99 \frac{\bar{y} - y_{\text{ref,min}}}{y_{\text{ref,max}} - y_{\text{ref,min}}}, \quad y_{\text{ref,max}} > y_{\text{ref,min}}, \quad (2.34)$$

де  $I$  – нормований вихідний показник;  $\bar{y}$  – усереднений первинний сигнал;  $y_{\text{ref,min}}$  і  $y_{\text{ref,max}}$  – відповідно нижнє та верхнє опорні значення, спільні для порівнюваних режимів, як у формулі (3.17). Значення 1 і 100 відповідають прийнятим опорним відлікам та не означають відповідно найгіршої й найкращої якості палива.

## 2.7 Висновки до розділу 2

Розроблено математичну модель формування вихідного сигналу СМЯСП, яка пов'язує діелектричні властивості базової паливної суміші та додатковий вплив домішок із геометричними параметрами ДДП, характеристиками вимірювального кола й електронного блока. Для опису базового стану передбачено використання палив В0, В50 і В100, що відповідають часткам біопалива 0, 50 і 100 %, та температурного діапазону 10–30 °С з опорною температурою 20 °С. Температурну залежність подано поліномом другого

порядку, коефіцієнти якого підлягають експериментальному визначенню. Запропоновано оцінювати стан палива за відхиленням поточного сигналу від базового значення для однакових складу, температури та геометрії датчика. Математично показано, що один вимірювальний канал із рангом матриці чутливості не більше 1 не забезпечує одночасного визначення трьох невідомих характеристик умісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок.

Виконано порівняння конструктивних варіантів датчика з площами електродів 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup> за сталої ширини 10 мм, довжини відповідно 5, 10 і 15 мм, відстані між електродами 3 мм та товщини електродів 1,5 мм. За нормувальної різниці потенціалів 1 В у прийнятій розрахунковій постановці середній модуль напруженості поля становить відповідно 311,2; 318,7 і 321,2 В/м, а коефіцієнт його просторової варіації – 6,94; 6,08 і 5,59 %.

Показано, що збільшення площі розширює область відносно рівномірного поля, проте одночасно збільшує довжину ділянки контролю та її робочий об'єм. Збільшення площі електродів від 1,0 до 1,5 см<sup>2</sup> зменшує коефіцієнт варіації поля з 6,08 до 5,59 %, водночас збільшуючи довжину ділянки контролю та її об'єм на 50 %. При уточненні кроку розрахункової сітки з 0,25 до 0,125 мм для обраного варіанта середня напруженість змінилася на 0,28 %.

Обґрунтовано формування й подання вихідного сигналу системи в умовних одиницях з урахуванням параметрів зчитування, усереднення та базового рівня вимірювального каналу СМЯСП. Для реалізації прийнято резистор опором 1 МОм, напругу живлення ЕБ 5 В і 30 внутрішніх зчитувань на один програмний відлік. Поточний сигнал визначається усередненням 5 відліків, а базовий рівень очищеного сухого датчика в повітрі – усередненням 20 відліків. Для індикації задано відносні пороги перевищення повітряної бази на 20 і 50 % та гістерезис, що становить 5 % базового відліку.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Мета, завдання та програма досліджень СМЯСП

Мета експериментальних досліджень – установити вплив частки біопалива, температури палива та площі електродів ДДП на вихідний сигнал СМЯСП, побудувати регресійну залежність базового сигналу від зазначених факторів та оцінити можливість установаження системи в паливну магістраль дизельного двигуна.

Для досягнення поставленої мети програма досліджень передбачає такі завдання:

Підготовку лабораторного стенда, перевірку герметичності з'єднань, працездатності ДДП та ЕБ.

Приготування проб з об'ємною часткою біопалива 0, 50 і 100 % (B0, B50 та B100). Для порівнянності результатів використовували вихідні компоненти однієї партії та однаковий порядок підготовки й перемішування проб.

Проведення повного трифакторного експерименту за температури 10, 20 і 30 °C та площі електродів 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup> зі сталою відстанню між ними 3 мм.

Встановлення впливу частки біопалива, температури та площі електродів на вихідний сигнал.

Побудову квадратичної регресійної моделі з урахуванням лінійних складових, квадратів факторів та їх парних взаємодій. Узгодженість моделі з експериментальними даними оцінювали за коефіцієнтом детермінації, середньоквадратичним і максимальним абсолютним відхиленнями розрахункових значень.

Побудову поверхонь відгуку, що відображають вплив двох змінних факторів за фіксованого рівня третього. Отримані залежності зіставляли з математичною моделлю розділу 2 та використовували для обґрунтування площі електродів.

Апробацію встановлення системи на мінітракторі «Булат 244» із перевіркою розміщення ДДП, кріплення ЕБ, підключення живлення, герметичності з'єднань та зчитування сигналу.

На рисунку 3.1 наведено послідовність основного дослідження  $B-T-A$ .



Рисунок 3.1 – Структурно-логічна схема експериментального дослідження

Первинною величиною є вихідний сигнал  $U$ . Його усереднюють і подають також у нормованій шкалі  $I$ . Відстань між електродами  $d = 3$  мм, опір  $R = 1$  МОм та напруга живлення  $U = 5$  В є спільними параметрами.

### 3.2 Конструкція ДДП та ЕБ СМЯСП

На лабораторному стенді використано ДДП із плоскопаралельними електродами. Датчик містить корпус із двома електродами. Частина проточного каналу між електродами є ділянкою контролю палива.

Для проведення експериментальних досліджень виготовлено дослідний зразок СМЯСП, конструкція якого забезпечує збереження заданих геометричних параметрів, зручність обслуговування та можливість

встановлення у проточному паливному контурі. Загальний вигляд СМЯСП із зовнішнім джерелом живлення зображено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Тривимірна модель СМЯСП із зовнішнім джерелом живлення

Дослідний зразок СМЯСП складається з ДДП та ЕБ зчитування, оброблення й індикації сигналу. Корпус ДДП фіксує електроди та забезпечує проходження палива через ділянку контролю. Компоненти ЕБ, зокрема дисплей і світлодіодні індикатори, розміщено в окремому полімерному корпусі. Живлення системи здійснюється від зовнішнього джерела напругою 5 В. Під час лабораторних досліджень температуру палива контролювали окремим термометром. У наведеній програмній реалізації автоматичне зчитування температури та температурна компенсація сигналу не передбачені.

На LCD-дисплеї відображаються первинний вихідний сигнал «Raw» та текстове повідомлення, сформоване алгоритмом індикації. Світлодіоди показують відповідний програмний стан, визначений за заданими порогами сигналу.

ЕБ живиться від зовнішнього автономного джерела через USB-кабель. Це забезпечує можливість його використання на випробувальному стенді та на транспортному засобі.

Корпус ДДП виготовлено методом 3D-друку з PETG, вимірювальні електроди – з нержавіючої сталі, а герметичність з'єднань забезпечено гумовими ущільненнями. Усередині корпусу закріплено вимірювальні електроди датчика, а на обох кінцях передбачено штуцери для приєднання гнучких паливопроводів. Конструкція забезпечує проходження палива через ділянку контролю та герметичність з'єднань. Основні габарити корпусу ДДП наведено на рисунку 3.3.

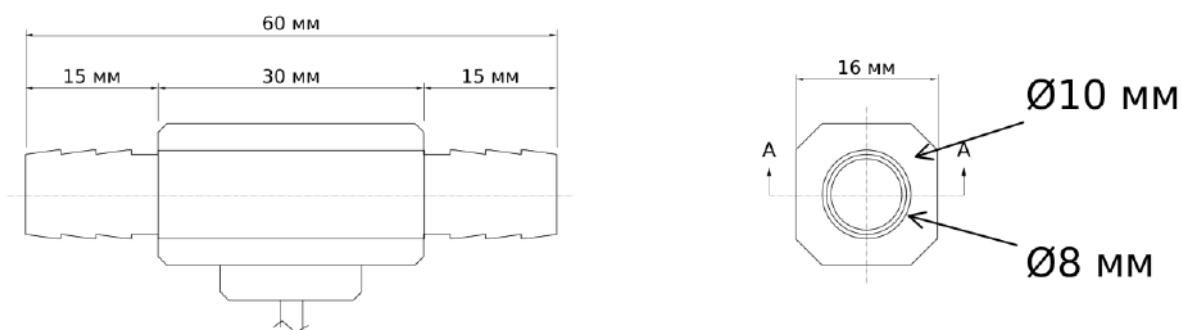


Рисунок 3.3 – Габаритне креслення корпусу ДДП

Електроди підключають до ЕБ зі збереженням незмінного положення кабелю та контактних з'єднань у межах серії. Власна ємність з'єднувальних провідників входить до базового сигналу й ураховується під час градуювання. Поздовжній розріз корпусу датчика наведено на рисунку 3.4.

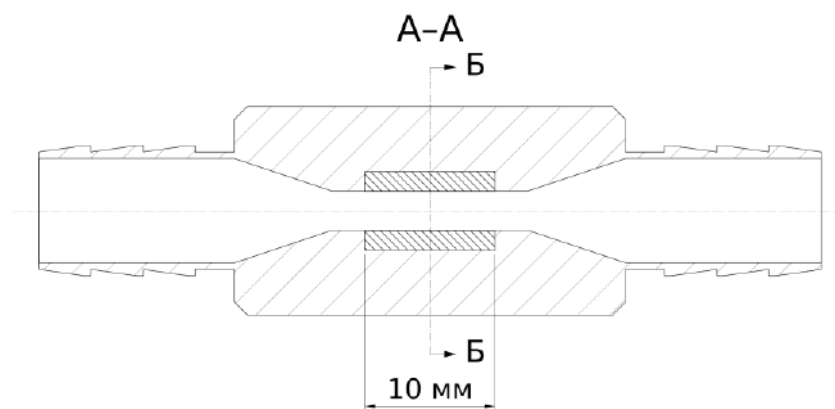


Рисунок 3.4 – Поздовжній розріз корпусу датчика з розміщенням електродів

Конструкція корпусу ДДП забезпечує сталість площі електродів і відстані між ними. Паливо проходить лише між робочими поверхнями двох плоскопаралельних електродів. Товщина кожного електрода становить 1,5 мм, відстань між електродами – 3 мм, ширина проточного каналу – 10 мм, а загальна висота посадкового паза – 6 мм. Для експериментальних досліджень передбачено електроди площею 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup>, які мають розміри відповідно 10×5, 10×10 і 10×15 мм. Поперечний розріз ділянки контролю та конструктивні варіанти електродів наведено на рис. 3.5.

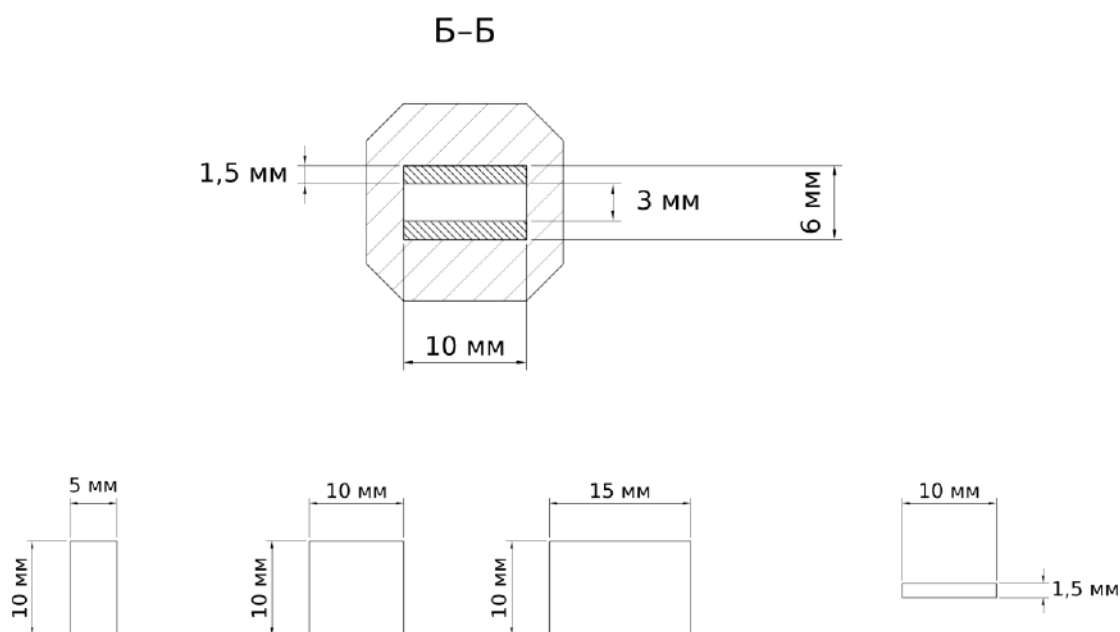


Рисунок 3.5 – Поперечний розріз ділянки контролю та конструктивні варіанти електродів

Для оброблення сигналу ДДП та індикації результатів контролю розроблено й виготовлено зразок електронного блока СМЯСП (рис. 3.6). Він забезпечує зчитування та програмне опрацювання отриманих даних, відображення вихідного сигналу на дисплеї й світлову індикацію стану контрольованого палива.

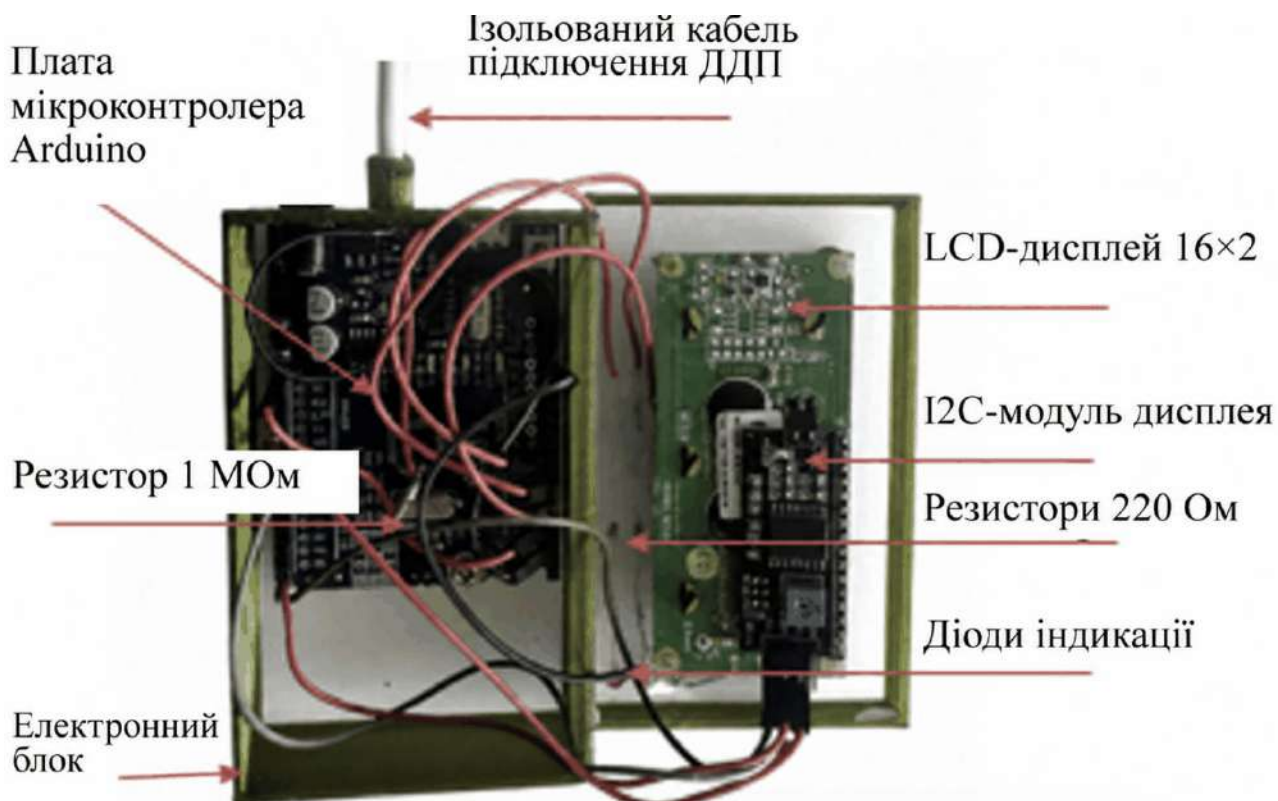


Рисунок 3.6 – Внутрішня будова електронного блока СМЯСП

Етап макетування ЕБ показано на рисунку 3.7. На макетній платі виконано з'єднання елементів вимірювального кола з платою Arduino, LCD-дисплеєм та світлодіодною індикацією. Таке виконання використовували під час складання й початкового налагодження ЕБ перед розміщенням його компонентів у корпусі.

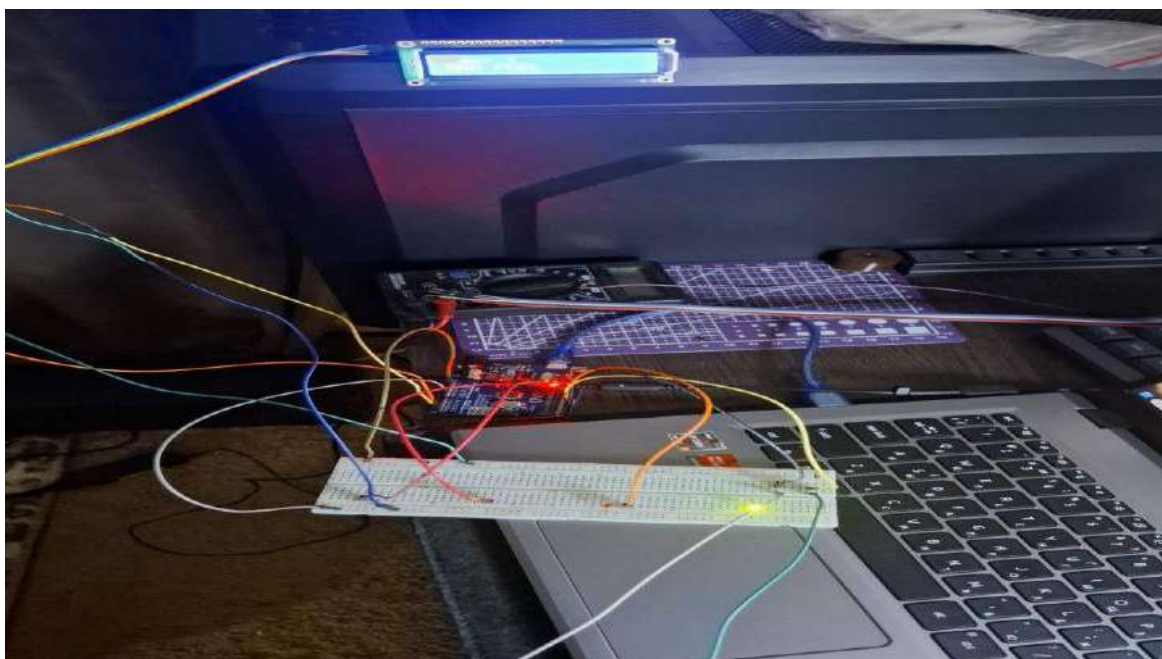


Рисунок 3.7 – Макетування та налагодження ЕБ

ЕБ побудовано на платформі Arduino із зарядним резистором опором 1 МОм і напругою живлення 5 В. Для зчитування використано бібліотеку CapacitiveSensor [125]. Отриманий програмний відлік реєструють як вихідний сигнал в умовних одиницях.

У наведеній конфігурації виводи передавання й приймання сигналу відповідають D4 і D2: CapacitiveSensor  $C_s(4, 2)$ . Результат виводиться на LCD-дисплей 16×2 з інтерфейсом I<sup>2</sup>C. Число внутрішніх циклів бібліотеки, усереднення та інтервал реєстрації задаються програмою; їх відокремлюють від кількості повторних вимірювань паливної проби.

Первинні відліки  $U$  зберігають у протоколі разом із налаштуваннями програми. Після усереднення вихідний сигнал подають також у нормованій шкалі 1–100 ум. од.

Після складання ЕБ виконували програмування мікроконтролера та початкове налагодження системи в середовищі Arduino IDE. Програмування й налагодження перед експериментальними вимірюваннями показано на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Програмування та початкове налаштування СМЯСП

### 3.3 Лабораторний стенд та умови проведення досліджень

СМЯСП досліджували на лабораторному стенді із замкненим контуром циркуляції. Його будова забезпечує проходження палива через ДДП, регулювання подавання та контроль параметрів потоку. Обладнання поділено на складові стенда та допоміжні засоби підготовки проб і СМЯСП.

Структурну схему стенда наведено на рисунку 3.9. Паливо надходить із ємності через насос, витратомір і датчик, після чого проходить ділянку контролю тиску та регулювальний кран і повертається в ємність.



Рисунок 3.9 – Схема експериментального стенда: 1 – джерело живлення та керування; 2 – паливний насос; 3 – витратомір; 4 – СМЯСП; 5 – джерело живлення; 6 – манометр; 7 – регулювальний кран; 8 – паливна ємність.

Загальний вигляд зібраного стенда наведено на рисунку 3.10. Вузли закріплено на спільній основі зі збереженням доступу до з'єднань. Паливопроводи з'єднують основні елементи стенда в замкнений контур, яким паливо циркулює через ділянку контролю.

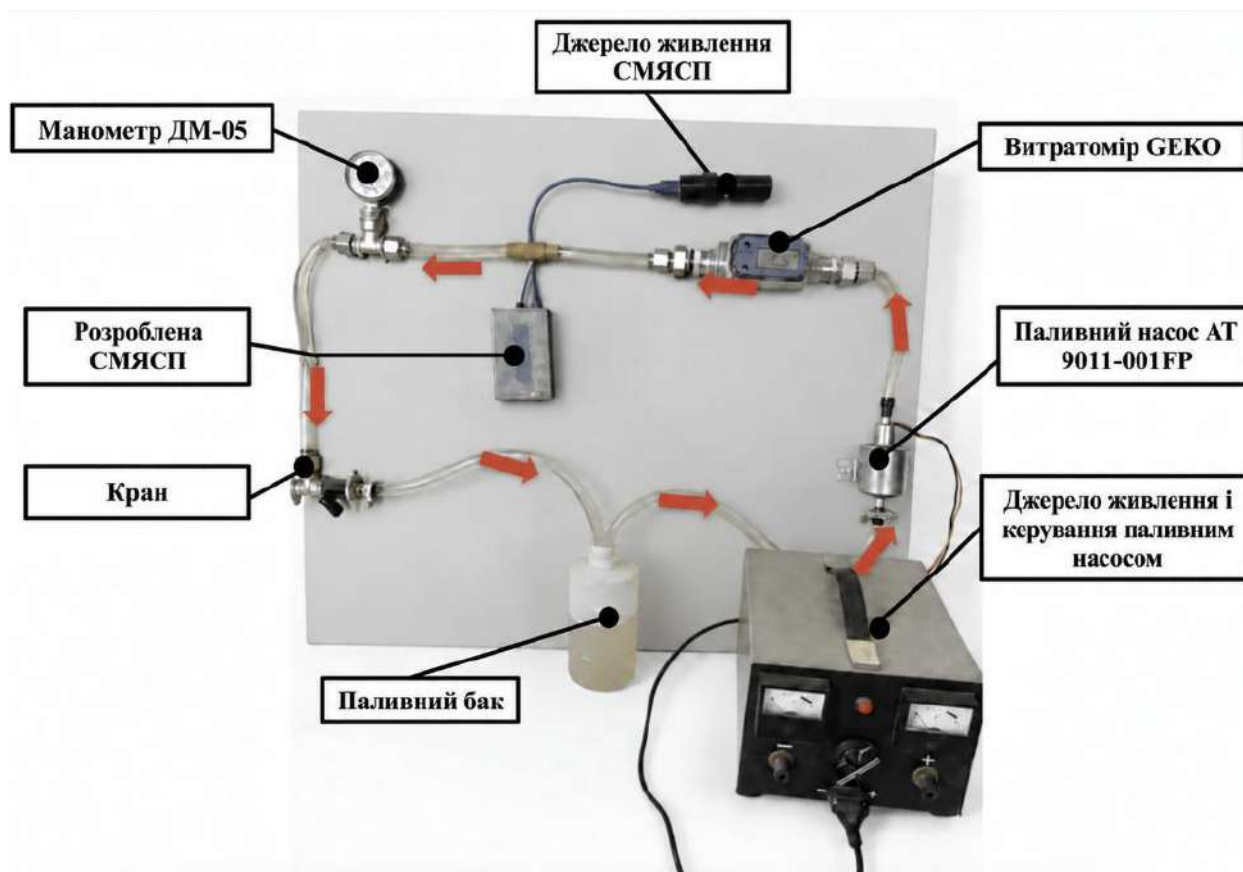


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд лабораторного стенда

До складу лабораторного стенда входять паливний бак місткістю 0,7 л, паливний насос АТ 9011-001FP, витратомір GEKO, манометр ДМ-05, регулювальний кран, гнучкі паливопроводи, дослідний зразок СМЯСП, джерело живлення СМЯСП та джерело живлення і керування паливним насосом. Елементи з'єднано в замкнений контур, у якому паливо проходить через витратомір і ДДП та повертається до бака. Регулювальний кран дає змогу змінювати гідравлічний опір контуру, а витратомір і манометр забезпечують контроль витрати й тиску палива.

На стенді досліджували три конструктивні варіанти ДДП, описані в підрозділі 3.2, за однакових налаштувань вимірювального каналу СМЯСП.

Характеристики та загальний вигляд окремих елементів стенда наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Основні елементи лабораторного стенда

| Обладнання та характеристики                                                                                                                                                                                                                                                 | Загальний вигляд                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Паливний насос АТ 9011-001FP [140]</b><br/> Тип – електричний мембранний насос низького тиску.<br/> Продуктивність – до 100 л/год.<br/> Номінальний тиск – 0,2–0,3 бар (20–30 кПа).<br/> Живлення на стенді – 12 В.<br/> Забезпечує циркуляцію проби через датчик.</p> |    |
| <p><b>Проточний витратомір GEKO</b><br/> Пропускна здатність 10 –120 л/хв;<br/> Похибка – <math>\pm 1,0</math> %;<br/> Повторюваність – <math>\pm 0,5</math> %.</p>                                                                                                          |    |
| <p><b>Джерело живлення насоса</b><br/> Робоча напруга на стенді – 12 В.<br/> Шкала вольтметра на панелі – 0–15 В.<br/> Шкала амперметра на панелі – 0–15 А.<br/> Регулювання вихідної напруги.</p>                                                                           |  |

## Допоміжне обладнання

Для підготовки проб і налагодження ЕБ застосовано обладнання, наведене в таблиці 3.2. Його використання пов'язане з перемішуванням і зважуванням компонентів, контролем температури та перевіркою електричних сигналів.

Таблиця 3.2

## Допоміжне обладнання для проведення досліджень

| Обладнання та характеристики                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Загальний вигляд                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Магнітна мішалка PCE-MSR 10 [141]</b><br/> Частота обертання – 200–1600 об/хв.<br/> Максимальний об'єм перемішування – 5 л.<br/> Кількість робочих місць – 1.<br/> Споживана потужність – 10 Вт.<br/> Живлення – 100–240 В; 50/60 Гц.<br/> Робоча поверхня – 173 × 180 мм.</p>                                               |    |
| <p><b>Електронні ваги Saturn</b><br/> Максимальна вага 5 кг;<br/> Дискретність – 1 г;</p>                                                                                                                                                                                                                                          |   |
| <p><b>Цифровий термометр</b><br/> Максимальна температура – 250 °С.</p>                                                                                                                                                                                                                                                            |  |
| <p><b>Осцилограф OWON XDS3104E [142]</b><br/> Кількість аналогових каналів – 4.<br/> Смуга пропускання – 100 МГц.<br/> Максимальна частота дискретизації – 1 Гвиб/с.<br/> Розрядність аналого-цифрового перетворювача (АЦП) – 8 біт.<br/> Глибина пам'яті – 40 млн відліків.<br/> Вертикальна чутливість – 1 мВ/под.–10 В/под.</p> |   |

| Обладнання та характеристики                                                                                                                                                                                                                                     | Загальний вигляд                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <p align="center"><b>Цифровий мультиметр</b></p> <p>За маркуванням перемикача на фото:<br/> постійна напруга – межі 200 мВ; 2; 20;<br/> 200; 600 В;<br/> змінна напруга – межі 200 і 600 В;<br/> постійний струм – до 10 А;<br/> опір – верхня межа 200 МОм.</p> |  |

### 3.4 Методика приготування лабораторних проб суміші палив

Для приготування дослідних проб використовують ДП нафтового походження та біопаливо, які змішують у заданих об'ємних співвідношеннях [143, 144]. Об'єм кожного компонента визначають відповідно до потрібної частки біопалива та загального об'єму проби. Для всіх проб використовують ті самі вихідні компоненти, а після змішування паливо ретельно перемішують [145]. Зразки базового ДП нафтового походження та біопалива, використаних для приготування дослідних проб, наведено на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Зразки базового ДП нафтового походження та біопалива

Для попередніх досліджень та отримання базових характеристик СМЯСП використано товарні зразки літнього ДП мереж WOG, ОККО та «Укрнафта», а також зразок біопалива.

Перед зчитуванням сигналу температуру кожної проби контролюють термометром із виносним щупом, наведеним у таблиці 3.2.

Для основної серії відібрано одну партію ДП.

Для підготовки лабораторних проб застосовували магнітну мішалку PCE Instruments та електронні ваги Saturn (таблиця 3.2). Ваги використовували для контролю маси базового палива й підготовлених порцій, а магнітну мішалку – для перемішування компонентів перед подаванням проби у вимірювальний контур.

Магнітна мішалка створює обертання магнітного перемішувального елемента, розміщеного всередині посудини з пробю. Інтенсивність перемішування задають регулятором на передній панелі.

Перед зважуванням ваги встановлюють на рівну нерухому поверхню, обирають грами й тарують порожню суху посудину. Після внесення палива реєструють масу нетто за усталеного показу

Послідовність підготовки паливної проби наведено на рисунку 3.12.

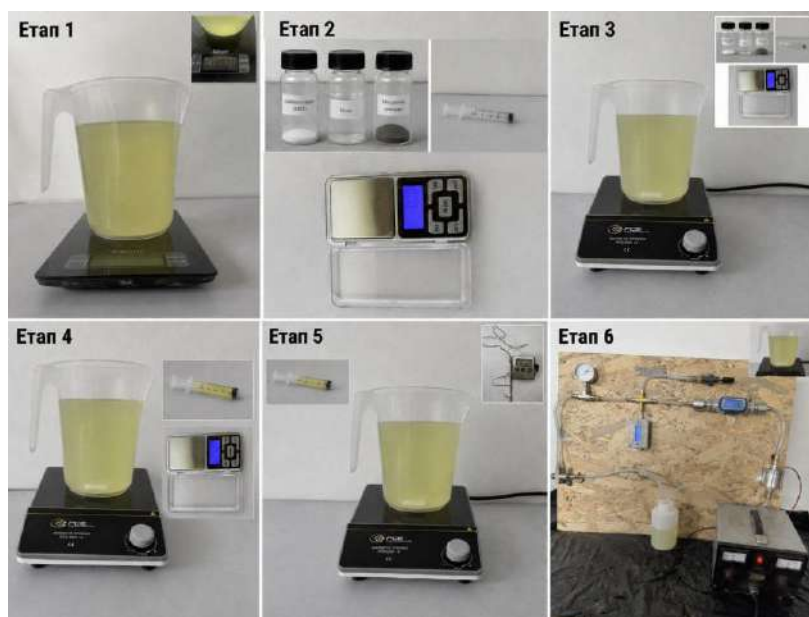


Рисунок 3.12 – Послідовність підготовки проби: дозування компонентів, перемішування, стабілізація та подавання у контур

Проби основного експерименту готують із єдиних партій ДП та біопалива. Об'ємну частку визначають за сумою відміряних об'ємів компонентів за однакової температури:

$$B = 100 \frac{V_{\text{bio}}}{V_{\text{bio}} + V_{\text{D}}}, \quad (3.1)$$

де  $B$  – об’ємна частка біопалива, %;  $V_{\text{bio}}$  та  $V_{\text{D}}$  – об’єми біопалива та ДП, відміряні за однакової температури. Частки 0, 50 і 100 % відповідають  $B_0$ ,  $B_{50}$  та  $B_{100}$ .

### 3.5 Планування та методика проведення експерименту

Вибір факторів основного експерименту відповідає структурі моделі, наведеної в розділі 2: частка біопалива та температура характеризують стан паливного середовища, а площа електродів є конструктивним параметром датчика. Їх спільне варіювання дає змогу визначити базовий відгук СМЯСП та оцінити взаємодії факторів. Відстань між електродами у цьому експерименті зафіксовано на рівні 3 мм.

В основному експерименті варіюють об’ємну частку біопалива  $B = 0; 50; 100$  %, температуру  $T = 10; 20; 30$  °C та площу електродів  $A = 0,5; 1,0; 1,5$  см<sup>2</sup>. Такий вибір факторів дає змогу встановити базовий відгук  $B_0$ ,  $B_{50}$  та  $B_{100}$  і врахувати його залежність від температури та геометрії датчика. Рівні факторів наведено в таблиці 3.3, контрольовані умови – у таблиці 3.4, єдину матрицю планування – в таблиці В.1 додатка В.

Таблиця 3.3

#### Діапазони варіювання факторів експерименту

| Фактор                              | Позначення | Нижній рівень | Основний рівень | Верхній рівень | Одиниця         |
|-------------------------------------|------------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Вміст біопалива у сумішевому паливі | $B$        | 0             | 50              | 100            | %               |
| Температура палива                  | $T$        | 10            | 20              | 30             | °C              |
| Площа електродів                    | $A$        | 0,5           | 1,0             | 1,5            | см <sup>2</sup> |

Таблиця 3.4

## Контрольовані умови та вихідні параметри експерименту

| Група параметрів         | Склад                                                                                                                                                          |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вихідні величини         | Вихідний сигнал $\mathcal{Y}$ , ум. од.; середнє $\bar{\mathcal{Y}}$ ; стандартне відхилення $S_{\mathcal{Y}}$ ; нормований сигнал $I$ , ум. од.               |
| Стабілізовані умови      | відстань між електродами $d = 3$ мм; ширина каналу 10 мм; напруга живлення $U = 5$ В; постійний час стабілізації температури; однаковий час промивання датчика |
| Неконтрольовані впливи   | похибка дозування компонентів суміші; температурний дрейф електронних компонентів; паразитні ємності; залишки попередньої проби                                |
| Повторність експерименту | Не менше трьох повторних вимірювань у кожній точці.                                                                                                            |

Основний експеримент виконують за повним факторним планом  $3^3$  із факторами  $B$ ,  $T$  та  $A$ . Матриця охоплює 27 поєднань рівнів факторів, наведених у таблиці 3.3. Для кожного поєднання реєструють вихідний сигнал за однаковою процедурою підготовки проби, температурної стабілізації та зчитування. Кількість повторних відліків і незалежних приготувань проб обліковують окремо [123].

Для опису залежності вихідного сигналу  $y$  від  $B$ ,  $T$  та  $A$  використовують квадратичну модель. Її прогнози зіставляють із значеннями основного набору; нормовані показники обчислюють за єдиними опорними значеннями.

Квадратична модель для трьох кодованих факторів має вигляд:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3.2)$$

де  $\hat{y}$  – розрахункове значення вихідного сигналу СМЯСП, ум. од.;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – кодовані значення частки біопалива, температури та площі електродів;  $b_0$  – вільний член;  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  – лінійні коефіцієнти;  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  – коефіцієнти взаємодії;  $b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{33}$  – квадратичні коефіцієнти.

Кодування факторів виконували за залежностями

$$x_1 = \frac{B - 50}{50}, \quad (3.3)$$

де  $x_1$  – безрозмірне кодоване значення об'ємної частки біопалива;  $B$  – її значення, %; 50 % – центральний рівень і крок варіювання цього фактора.

$$x_2 = \frac{T - 20}{10}, \quad (3.4)$$

де  $x_2$  – безрозмірне кодоване значення температури;  $T$  – температура палива, °C; 20 °C – центральний рівень; 10 °C – крок варіювання температури.

$$x_3 = \frac{A - 1}{0,5}, \quad (3.5)$$

де  $x_3$  – безрозмірне кодоване значення площі електродів;  $A$  – площа електродів, см<sup>2</sup>; 1 см<sup>2</sup> – центральний рівень; 0,5 см<sup>2</sup> – крок варіювання площі.

Загальна оцінка коефіцієнтів методом найменших квадратів має вигляд:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3.6)$$

де  $b$  – вектор оцінок коефіцієнтів регресії;  $X$  – матриця значень членів моделі, сформована за кодованими факторами;  $Y$  – вектор експериментальних значень сигналу; верхній індекс  $T$  позначає транспонування, а  $-1$  – обернену матрицю. Елементи  $X$  безрозмірні; елементи  $b$  і  $Y$  мають одиницю обраного сигналу. Вираз застосовний за повного стовпцевого рангу  $X$ .

У розрахунках підрозділу 4.3 використано коефіцієнти зі збереженого рівняння презентації. Формулу (3.6) наведено як загальний метод оцінювання; для відтворення збереженої моделі її коефіцієнти прийнято фіксованими.

Таблиця В.1 додатка В визначає умови основного експерименту. У кожній точці методикою передбачено не менше трьох повторних вимірювань.

Для перевірки інформативності вихідного сигналу передбачено окремі серії для В0, В50 і В100 за температури  $T = 20$  °C, площі електродів  $A = 1,0$  см<sup>2</sup> та відстані між електродами  $d = 3$  мм. Для кожного складу реєструють п'ять повторних значень вихідного сигналу за незмінних налаштувань зчитування сигналу.

### 3.6 Методика статистичної обробки експериментальних даних

Первинні результати вимірювань систематизували в Microsoft Excel, де виконували табличні розрахунки середніх значень, відхилень та інших статистичних показників за наведеними нижче формулами. Графічне подання результатів, побудову поверхонь відгуку та їхніх контурних проєкцій здійснювали в OriginPro.

Статистичне опрацювання виконують за первинними значеннями вихідного сигналу  $y$ . Для  $n$  повторних відліків однієї проби середнє визначають за формулою (3.7).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.7)$$

де  $\bar{y}$  – середній сигнал;  $y_i$  –  $i$ -й відлік;  $n$  – кількість повторних відліків. Значення  $\bar{y}$  та  $y_i$  подають в умовних одиницях вихідного сигналу.

Стандартне відхилення повторних відліків обчислюють за формулою (3.8). Кількість програмних циклів не підміняє кількість незалежних спостережень.

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}, \quad (3.8)$$

де  $s_y$  – вибіркове стандартне відхилення повторних відліків;  $y_i$  –  $i$ -й відлік;  $\bar{y}$  – середнє значення;  $n$  – кількість відліків,  $n > 1$ ; знак  $\Sigma$  позначає підсумовування від  $i = 1$  до  $n$ . Величина  $s_y$  має ту саму одиницю, що й сигнал  $y$ .

Якість відтворення вихідного сигналу оцінюють за коефіцієнтом  $R^2 = 1 - \text{SSE}/\text{SST}$ , середньоквадратичною похибкою RMSE та максимальним абсолютним відхиленням прогнозів від значень  $y$ . Для 27 точок SSE є сумою квадратів залишків  $y - \hat{y}$ , SST – сумою квадратів відхилень  $y$  від середнього, а RMSE – коренем із  $\text{SSE}/27$ . Відносний RMSE обчислюють як  $\text{RMSE}/\bar{y} \cdot 100 \%$ . У підрозділі 4.3 оцінено модель зі збереженими фіксованими коефіцієнтами.

Стандартний F-критерій загальної значущості регресії застосовний за умов оцінювання коефіцієнтів методом найменших квадратів на відповідному наборі даних [124].

Інформативність вихідного сигналу щодо розрізнення досліджених складів палива оцінюють за різницями середніх відгуків із урахуванням повторюваності. Розрахунки виконують у первинній шкалі сигналу  $У$ . Стандартну невизначеність середнього за типом А визначають за формулою:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (3.9)$$

де  $s$  – стандартне відхилення повторних показів, позначене вище як  $S_y$ , ум. од.;  $n$  – кількість незалежних повторних показів. Для двох незалежних серій різниця середніх дорівнює  $\Delta\bar{y} = \bar{y}_2 - \bar{y}_1$ , а стандартна невизначеність цієї різниці за типом А становить:

$$u_A(\Delta\bar{y}) = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}, \quad (3.10)$$

де  $s_1, s_2$  – стандартні відхилення відповідних серій, ум. од.;  $n_1, n_2$  – кількість незалежних повторних показів у цих серіях. Для попарних порівнянь прийнято рівень довіри 0,95, що відповідає рівню значущості  $\alpha = 0,05$ . Межі довірчого інтервалу за методом Велча визначають як  $\Delta\bar{y} \pm h$ , де  $h = t_{0,975;\nu} \cdot u_A(\Delta\bar{y})$ . Коефіцієнт  $t_{0,975;\nu}$  є квантилем розподілу Стюдента для ймовірності 0,975 та числа ступенів вільності  $\nu$ . Ефективне число ступенів вільності обчислюють за формулою Велча–Саттертвейта [146]:

$$\nu = \frac{(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2})^2}{\frac{(\frac{s_1^2}{n_1})^2}{n_1 - 1} + \frac{(\frac{s_2^2}{n_2})^2}{n_2 - 1}}. \quad (3.11)$$

Метод передбачає незалежність спостережень та приблизну нормальність їх розподілу. Якщо інтервал не містить нуля, різницю середніх вважають статистично значущою на прийнятому рівні значущості. Рівень довіри

стосується кожного попарного порівняння окремо. Інтервали враховують повторюваність і не замінюють повного бюджету невизначеності вимірювального каналу.

Середню чутливість вихідного сигналу до зміни частки біопалива за фіксованих температури та геометричних параметрів ДДП визначають за формулою:

$$S_B = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{B_2 - B_1}, \quad (3.12)$$

де  $\bar{y}_1, \bar{y}_2$  – середні вихідні сигнали для порівнюваних складів, ум. од.;  $B_1, B_2$  – об’ємні частки біопалива, %. Величина  $S_B$  характеризує середній приріст сигналу на один відсотковий пункт зміни частки біопалива в заданому інтервалі.

Короткочасну стабільність характеризують розмахом показів, відносним розмахом та максимальним абсолютним відхиленням від початкового показу:

$$R = y_{\max} - y_{\min} \quad (3.13)$$

$$R_{\text{відн}} = \frac{R}{|\bar{y}|} \cdot 100 \% \quad (3.14)$$

$$D_{\max} = \max_i |y_i - y_0| \quad (3.15)$$

$$D_{\text{відн}} = \frac{D_{\max}}{|y_0|} \cdot 100 \%, \quad (3.16)$$

де  $y_{\max}, y_{\min}$  – найбільший і найменший покази;  $\bar{y}$  – середнє значення сигналу в часовій серії;  $y_0$  – початковий показ;  $y_i$  – показ у відповідний момент часу.

### 3.7 Нормування вихідного сигналу та алгоритм індикації СМЯСП

Для порівняльного подання результатів застосовують нормований вихідний сигнал  $I$  у шкалі 1–100 ум. од. відповідно до підрозділу 2.6. Первинні відліки  $y$  зберігають без зміни. Перед обробленням фіксують кількість

внутрішніх зчитувань CapacitiveSensor, конфігурацію підключення, опір і напругу живлення.

$$I = 1 + 99 \frac{\bar{y} - y_{\text{ref,min}}}{y_{\text{ref,max}} - y_{\text{ref,min}}}, \quad (3.17)$$

де  $I$  – нормований вихідний сигнал, ум. од.;  $\bar{y}$  – середнє повторних відліків;  $y_{\text{ref,min}}$  і  $y_{\text{ref,max}}$  – нижнє та верхнє опорні значення

Для нормованого подання даних таблиці 4.1 нижнім опорним значенням приймають 31,17880 ум. од., верхнім – 68,80589 ум. од. Для всіх 27 умов використовують спільний опорний інтервал 37,62710 ум. од. За формулою (3.17) нормований показник визначають як  $I = 1 + 99(y - 31,17880)/37,62710$ . У розрахунках використовують неокруглені опорні значення; наведений запис округлено до п'яти знаків. Перетворення змінює масштаб подання результатів зі збереженням їхнього порядку.

$$s_I = \frac{99}{y_{\text{ref,max}} - y_{\text{ref,min}}} s_y, \quad (3.18)$$

де  $s_I$  – стандартне відхилення у нормованій шкалі;  $s_y$  – стандартне відхилення первинного сигналу. Формула описує масштабування за фіксованих опорних значень; невизначеність самих опорних значень оцінюють окремо.

У програмі додатка Б нормований показник  $I$  та стан світлової індикації обчислюють окремо. Нормування виконують за заданими опорними значеннями. Для світлової індикації використовують пороги 1,20RAW\_BASE та 1,50RAW\_BASE, де RAW\_BASE – базове значення сигналу очищеного сухого ДДП у повітрі. Перемикання залежить від поточного сигналу raw і попереднього стану; для зворотних переходів застосовують гістерезис 0,05RAW\_BASE. Зелений, жовтий і червоний кольори відповідають програмним станам із повідомленнями «CLEAN FUEL», «CHECK FUEL» та «CONTAMINATED FUEL» відповідно. Перемикання станів відбувається за заданими порогоми вихідного сигналу та демонструє роботу індикаційного каналу.

Послідовність зчитування, оброблення сигналу та порогової індикації наведено на рисунку 3.13.

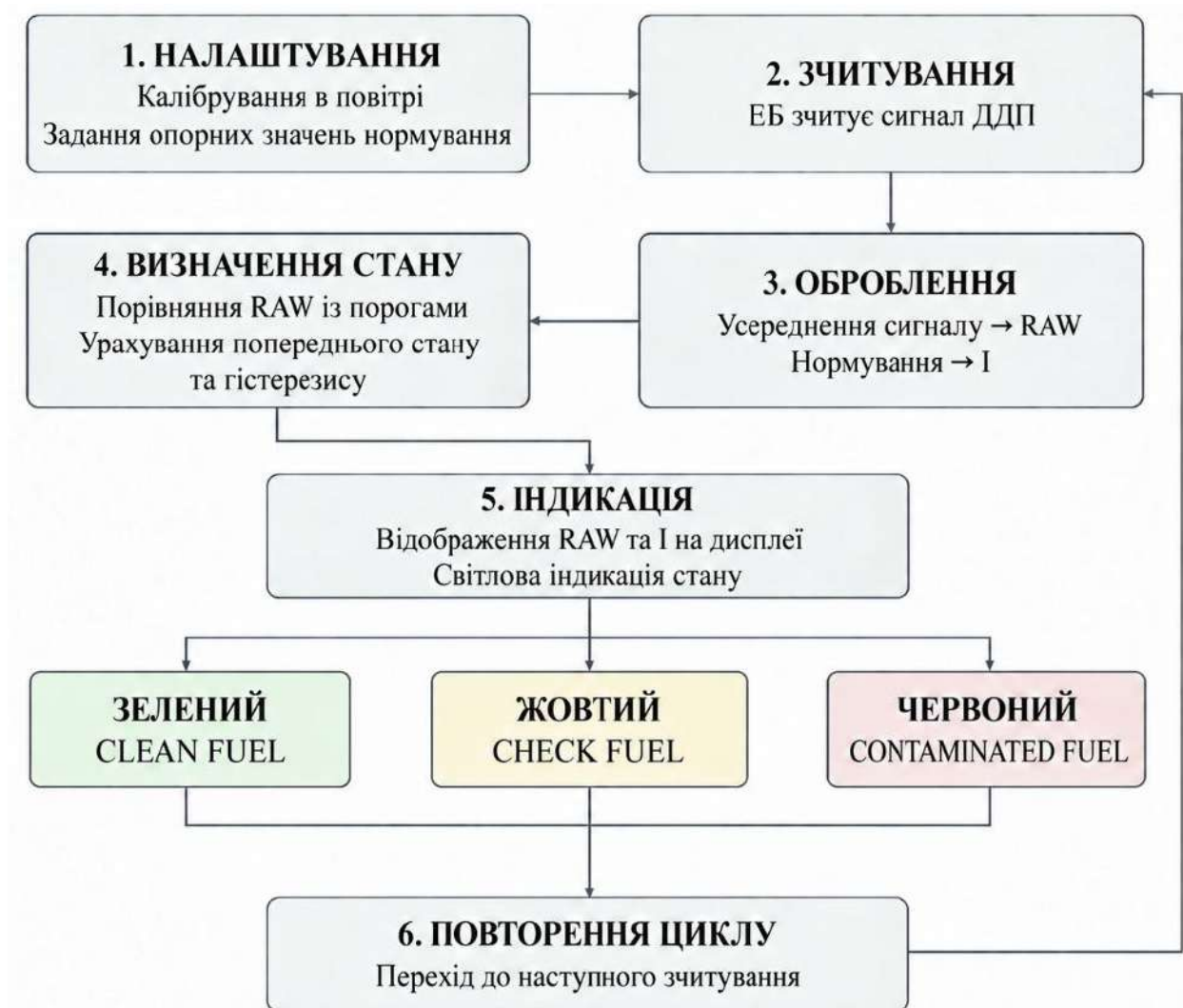


Рисунок 3.13 – Алгоритм зчитування, оброблення та індикації сигналу СМЯСП

Для подальшого застосування СМЯСП для оцінювання змін стану палива запропоновано зіставляти поточний сигнал із базовою характеристикою відповідного компонентного складу й температури за незмінної геометрії ДДП.

### 3.8 Висновки до розділу 3

Розроблено програму та методику експериментального дослідження впливу компонентного складу палива, температури та площі електродів на

вихідний сигнал СМЯСП. Для досліджень прийнято проби В0, В50 і В100 та температурні рівні 10, 20 і 30 °С. Методикою передбачено не менше трьох повторних вимірювань для кожного режиму, використання тих самих партій вихідних компонентів, єдиний порядок підготовки проб і температурної стабілізації та незмінні налаштування вимірювального каналу.

Створено лабораторний стенд із замкненим контуром циркуляції, який містить паливну ємність місткістю 0,7 л, насос АТ 9011-001FP із паспортною продуктивністю до 100 л/год і номінальним тиском 20–30 кПа, витратомір, дослідний зразок СМЯСП, манометр та регулювальний кран. Виготовлено плоскопаралельний ДДП у корпусі з PETG з електродами з нержавіючої сталі розмірами 10 × 5, 10 × 10 і 10 × 15 мм та площею відповідно 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup>. За відстані між електродами 3 мм об'єми ділянки контролю становлять 0,15; 0,30 та 0,45 мл. ЕБ реалізовано на платформі Arduino з використанням бібліотеки CapacitiveSensor для зчитування первинного вихідного сигналу в умовних одиницях. Опір резистора вимірювального кола становить 1 МОм, напруга живлення – 5 В.

Визначено порядок статистичного опрацювання результатів і побудови квадратичної регресійної моделі з урахуванням лінійних складових, квадратів факторів та їхніх парних взаємодій. Передбачено визначення середнього сигналу, стандартного відхилення, чутливості й показників короткочасної стабільності. Відповідність моделі зі збереженими коефіцієнтами оцінюють за коефіцієнтом  $R^2$ , середньоквадратичною похибкою та максимальним абсолютним відхиленням. Відносний RMSE визначають щодо середнього вихідного сигналу. Для перевірки інформативності передбачено по п'ять повторних вимірювань кожного складу палива за температури 20 °С та площі електродів 1,0 см<sup>2</sup>. Значущість різниць середніх сигналів оцінюють методом Велча з рівнем довіри 0,95 для кожного попарного порівняння.

Розроблено порядок нормування вихідного сигналу до шкали 1–100 ум. од. зі спільними опорними значеннями 31,18 і 68,81 ум. од. та збереженням первинних відліків. Реалізовано алгоритм індикації з відображенням

первинного сигналу «Raw» і текстового повідомлення на LCD-дисплеї  $16 \times 2$  символи. Зелений світлодіод і повідомлення «CLEAN FUEL» відповідають нормальному програмному стану; жовтий і «CHECK FUEL» – попередженню про відхилення сигналу та необхідність перевірки палива; червоний і «CONTAMINATED FUEL» – стану тривоги за перевищення встановленого порога. Перемикання здійснюється з гістерезисом зворотних переходів. Індикація характеризує стан за заданими порогамі сигналу без визначення виду та концентрації домішок. Для подальшого оцінювання змін стану палива запропоновано порівнювати поточний сигнал із базовою характеристикою відповідного компонентного складу й температури.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ СУМІШЕВОГО ПАЛИВА

#### 4.1 Результати вимірювання вихідного сигналу СМЯСП

Вихідний сигнал  $U$  реєстрували за однакових налаштувань вимірювального каналу СМЯСП. Рівні факторів: об'ємна частка біопалива  $B$  - 0, 50 та 100 %; температура  $T$  - 10, 20 та 30 °С; площа електродів  $A$  - 0,5, 1,0 та 1,5 см<sup>2</sup>. Відстань між електродами — 3 мм. Для кожної площі електродів досліджено дев'ять поєднань складу й температури. Це дає змогу оцінити спільний вплив компонентного складу, температури та площі електродів на базовий сигнал СМЯСП. Кількісне визначення окремих домішок потребує спеціального градуювання за контрольними пробами.

Для стислості вихідний відгук позначено  $u$ , а прогноз квадратичної моделі —  $\hat{u}$ . Нормований показник  $I$  визначають за формулою (3.17). Коефіцієнти моделі та показники відхилення стосуються первинної шкали сигналу. Збільшення сигналу характеризує зміну відгуку за відповідних умов та саме по собі не означає погіршення якості палива.

Для аналізу використано 27 значень  $u$ , відновлених зі збереженої таблиці вихідних даних. Нумерацію точок зіставлено з матрицею плану в таблиці 4.5. Значення  $u$ , прогнози за рівнянням (4.2) та їхні різниці наведено в таблиці Г.1. Розрахунки виконано до округлення; у таблиці 4.1 сигнали подано до сотих. Окремі повторні та часові серії таблиць 4.7–4.9 використовують для оцінювання повторюваності, розрізнення середніх і стабільності.

За результатами лабораторних вимірювань для кожного поєднання частки біопалива, температури та площі електродів визначено середнє значення вихідного сигналу СМЯСП. На основі цих значень побудовано експериментальні залежності вихідного сигналу від площі електродів. На

кожному графіку наведено результати для палив B0, B50 і B100 за сталої температури. По осі абсцис відкладено площу електродів,  $\text{cm}^2$ , а по осі ординат – середній вихідний сигнал, ум. од.

Залежності за температури 10, 20 і 30 °C наведено відповідно на рисунках 4.1–4.3.

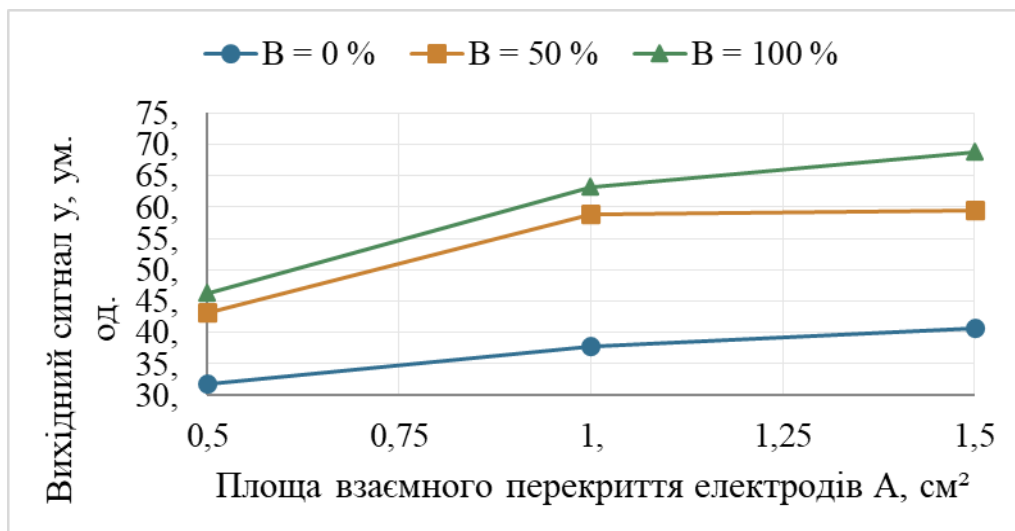


Рисунок 4.1 – Залежність вихідного сигналу від площі електродів при  $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

За температури 10 °C збільшення площі електродів від 0,5 до 1,5  $\text{cm}^2$  супроводжується зростанням сигналу для всіх досліджених складів. Для B100 сигнал зростає від 46,25 до 68,81 ум. од., тобто на 22,55 ум. од.; для B0 – від 31,84 до 40,76 ум. од. Більший приріст для B100 характеризує взаємодію частки біопалива та площі електродів.

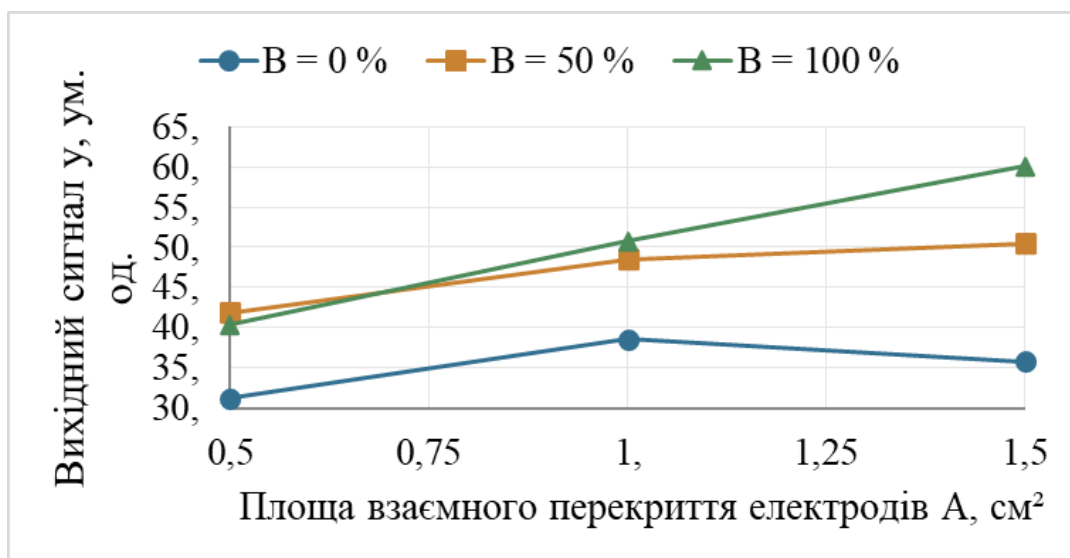


Рисунок 4.2 – Залежність вихідного сигналу від площі електродів при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

За температури 20 °C більша площа електродів дає вищий сигнал для B50 і B100. Для B0 залежність немонотонна: при переході від 0,5 через 1,0 до 1,5 см<sup>2</sup> сигнал становить відповідно 31,18; 38,57 та 35,78 ум. од. Отже, для B0 найбільше значення за цієї температури отримано при площі 1,0 см<sup>2</sup>.

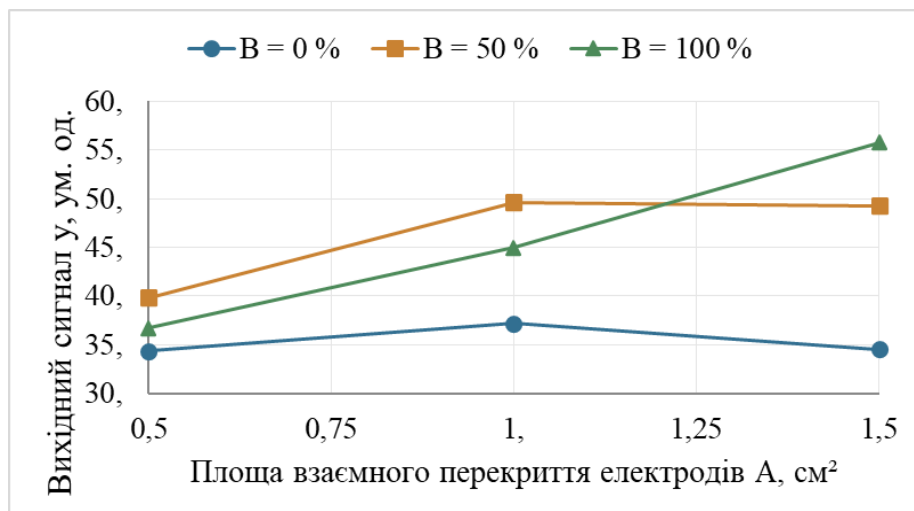


Рисунок 4.3 – Залежність вихідного сигналу від площі електродів при  $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

За температури 30 °C сигнал B100 зі збільшенням площі електродів послідовно зростає від 36,70 через 44,98 до 55,73 ум. од. Для B0 і B50 максимуми серед прийнятих рівнів площі припадають на 1,0 см<sup>2</sup>: відповідно 37,15 та 49,61 ум. од. При площі 1,5 см<sup>2</sup> ці сигнали зменшуються до 34,51 та 49,25 ум. од.

Усереднені за температурою залежності вихідного сигналу від площі електродів наведено на рисунку 4.4.

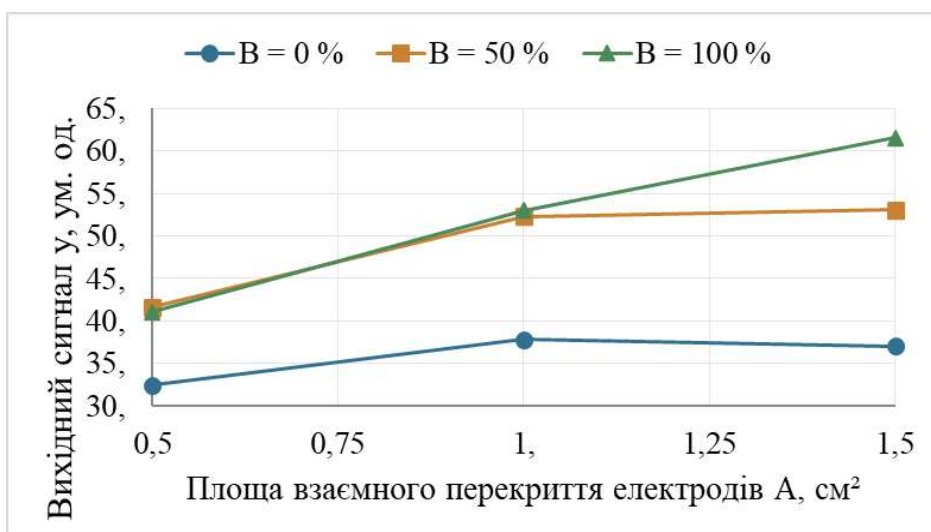


Рисунок 4.4 – Середній вплив площі електродів (усереднення по температурі)

Після усереднення за трьома температурами сигнали для площ 0,5; 1,0 та 1,5 см<sup>2</sup> становлять відповідно 32,46; 37,85; 37,02 ум. од. для B0; 41,66; 52,32; 53,09 ум. од. для B50; 41,10; 53,02; 61,54 ум. од. для B100. Для B0 залежність має максимум при 1,0 см<sup>2</sup>, тоді як для B50 і B100 середні значення послідовно зростають. Приріст між крайніми рівнями площі є найбільшим для B100.

Температура впливає на діелектричні властивості паливної суміші. Нижче наведено окремі графіки залежності  $U$  від  $T$  при фіксованій площі електродів.

Температурні залежності вихідного сигналу за площі електродів 0,5; 1,0 та 1,5 см<sup>2</sup> наведено відповідно на рисунках 4.5–4.7.

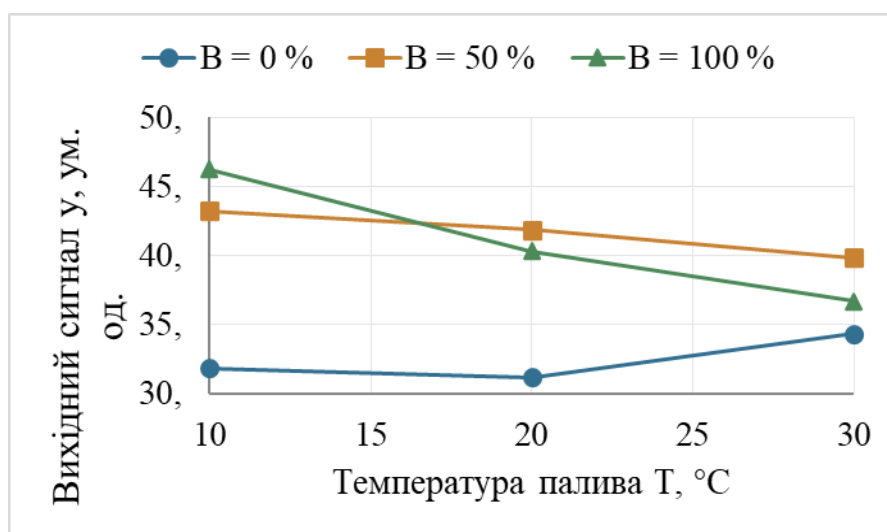


Рисунок 4.5 – Залежність вихідного сигналу від температури при  $A = 0,5$  см<sup>2</sup>

За площі 0,5 см<sup>2</sup> температурні залежності різняться для кожного складу. Для B0 сигнал становить 31,84; 31,18; 34,36 ум. од. за 10, 20 і 30 °C відповідно. Для B50 відповідні значення дорівнюють 43,24; 41,88; 39,85 ум. од., для B100 – 46,25; 40,33; 36,70 ум. од. Для B50 та B100 сигнал послідовно знижується, тоді як для B0 залежність немонотонна.

За підвищення температури від 10 до 30 °C різниця сигналів B100 і B0 за площі 0,5 см<sup>2</sup> зменшується від 14,41 до 2,34 ум. од. Температурна зміна може істотно зближувати відгуки палив різного складу. Порівнювати проби слід за однакової температури або за базовою характеристикою, визначеною для відповідних умов.

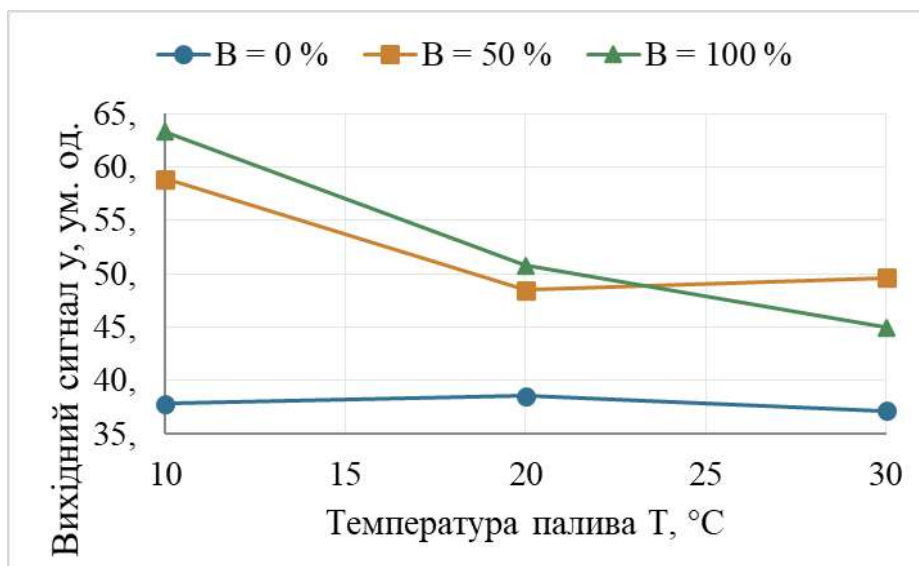


Рисунок 4.6 – Залежність вихідного сигналу від температури при  $A = 1,0 \text{ см}^2$

За площі  $1,0 \text{ см}^2$  підвищення температури від  $10$  до  $30 \text{ °С}$  зменшує сигнал В100 від  $63,28$  до  $44,98$  ум. од. Для В50 значення за  $10$ ,  $20$  та  $30 \text{ °С}$  становлять  $58,88$ ;  $48,47$ ;  $49,61$  ум. од., тобто після зниження до  $20 \text{ °С}$  спостерігається підвищення. Для В0 отримано  $37,83$ ;  $38,57$ ;  $37,15$  ум. од. За  $30 \text{ °С}$  сигнал В50 перевищує сигнал В100 на  $4,63$  ум. од., що потребує врахування температури під час зіставлення складів.

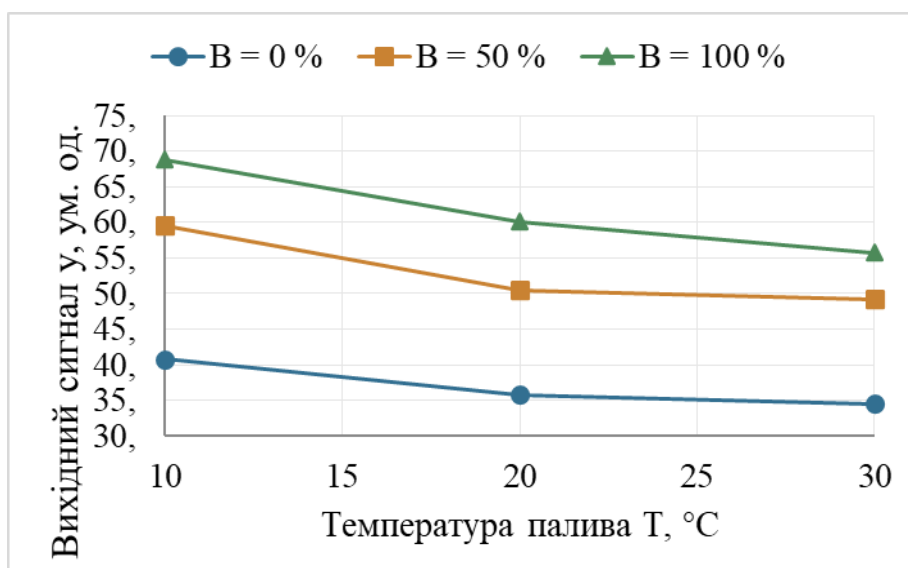


Рисунок 4.7 – Залежність вихідного сигналу від температури при  $A = 1,5 \text{ см}^2$

За площі  $1,5 \text{ см}^2$  для всіх трьох складів сигнал послідовно зменшується зі зростанням температури. Для В0 значення за  $10$ ,  $20$  та  $30 \text{ °С}$  становлять  $40,76$ ;  $35,78$ ;  $34,51$  ум. од.; для В50 –  $59,56$ ;  $50,46$ ;  $49,25$  ум. од.; для В100 –  $68,81$ ;  $59,56$ ;  $55,56$  ум. од.

60,09; 55,73 ум. од. Найбільший перепад між крайніми температурами становить 13,07 ум. од. для B100.

Вплив частки біопалива на вихідний сигнал залежить від температури й площі електродів. Залежності вихідного сигналу від частки біопалива за площі електродів 0,5; 1,0 та 1,5 см<sup>2</sup> наведено відповідно на рисунках 4.8–4.10.

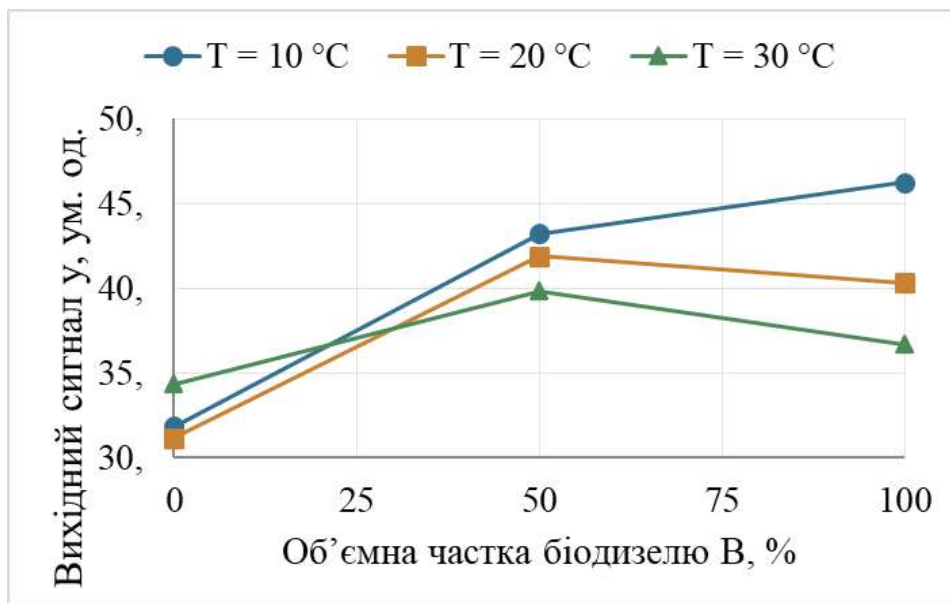


Рисунок 4.8 – Залежність вихідного сигналу від частки біопалива при  $A = 0,5 \text{ см}^2$

За площі 0,5 см<sup>2</sup> та температури 10 °C сигнал зі збільшенням частки біопалива послідовно зростає від 31,84 через 43,24 до 46,25 ум. од. За 20 °C відповідні значення становлять 31,18; 41,88; 40,33 ум. од., за 30 °C – 34,36; 39,85; 36,70 ум. од. За двох останніх температур найбільший відгук серед трьох складів отримано для B50.

Перевищення сигналу B50 над B100 становить 1,55 ум. од. за 20 °C та 3,15 ум. од. за 30 °C. За площі 0,5 см<sup>2</sup> вихідний сигнал не є однозначною мірою частки біопалива в усьому діапазоні. Під час вибору площі електродів слід враховувати характер залежності від складу та її температурні зміни.

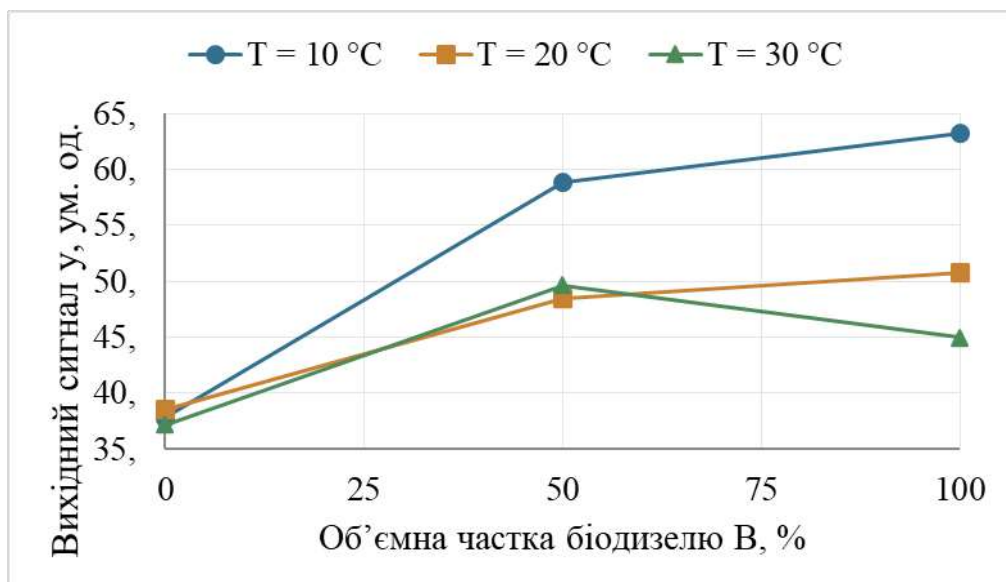


Рисунок 4.9 – Залежність вихідного сигналу від частки біопалива при  $A = 1,0 \text{ см}^2$

За площі  $1,0 \text{ см}^2$  сигнали B0, B50 і B100 послідовно зростають за  $10 \text{ °C}$  від 37,83 через 58,88 до 63,28 ум. од. та за  $20 \text{ °C}$  від 38,57 через 48,47 до 50,80 ум. од. За  $30 \text{ °C}$  послідовність становить 37,15; 49,61; 44,98 ум. од.; максимум серед трьох складів припадає на B50. Зростання у трьох опорних точках не встановлює монотонності між ними; межі монотонних гілок моделі визначено в підрозділі 4.4.

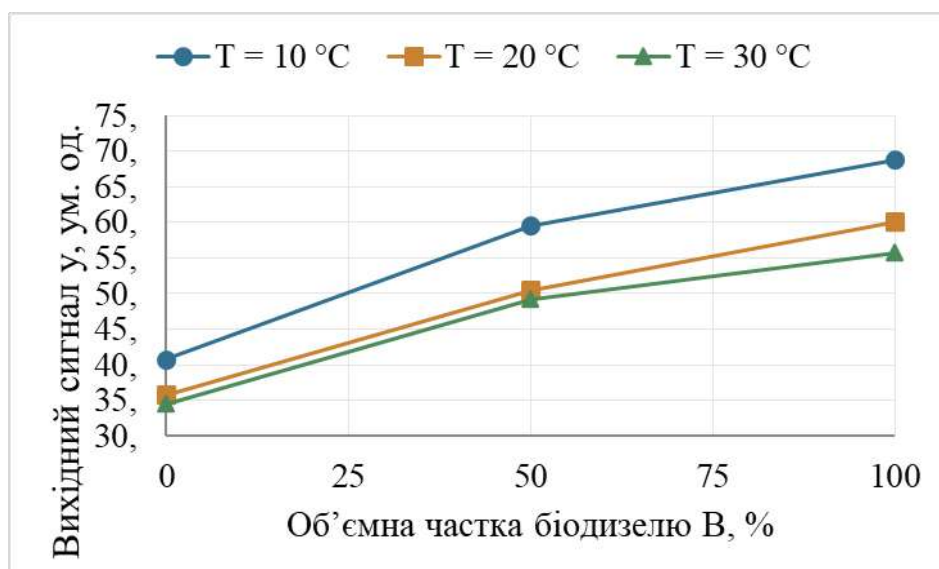


Рисунок 4.10 – Залежність вихідного сигналу від частки біопалива при  $A = 1,5 \text{ см}^2$

За площі 1,5 см<sup>2</sup> сигнал зі збільшенням частки біопалива послідовно зростає за всіх трьох температур. За 10 °С перехід від В0 до В100 підвищує відгук від 40,76 до 68,81 ум. од. Поєднання В = 100 %, Т = 10 °С та А = 1,5 см<sup>2</sup> відповідає найбільшому значенню відновленого набору.

У таблиці 4.1 наведено відновлені значення вихідного сигналу для 27 поєднань рівнів факторів.

Таблиця 4.1

**Середні значення вихідного сигналу У (ум. од.)**

| В, % | Т, °С | А = 0,5 см <sup>2</sup> | А = 1,0 см <sup>2</sup> | А = 1,5 см <sup>2</sup> |
|------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0    | 10    | 31,84                   | 37,83                   | 40,76                   |
| 0    | 20    | 31,18                   | 38,57                   | 35,78                   |
| 0    | 30    | 34,36                   | 37,15                   | 34,51                   |
| 50   | 10    | 43,24                   | 58,88                   | 59,56                   |
| 50   | 20    | 41,88                   | 48,47                   | 50,46                   |
| 50   | 30    | 39,85                   | 49,61                   | 49,25                   |
| 100  | 10    | 46,25                   | 63,28                   | 68,81                   |
| 100  | 20    | 40,33                   | 50,80                   | 60,09                   |
| 100  | 30    | 36,70                   | 44,98                   | 55,73                   |

Для В0 відгук перебуває в межах 31,18–40,76 ум. од.; за температур 20 і 30 °С найбільші значення отримано при площі 1,0 см<sup>2</sup>. Для В50 діапазон становить 39,85–59,56 ум. од., для В100 – 36,70–68,81 ум. од. Напрямок зміни сигналу залежить від фіксованих рівнів двох інших факторів. Порівняння складів і вибір площі потребують аналізу сукупності режимів.

За площі 1,0 см<sup>2</sup> різниця середніх сигналів В100 і В0 становить 25,45; 12,23 та 7,83 ум. од. відповідно за температур 10, 20 та 30 °С. Для площі 1,5 см<sup>2</sup> відповідні різниці більші: 28,05; 24,31 та 21,22 ум. од. Отже, збільшення площі підвищує розділення середніх відгуків крайніх складів. Варіант із площею електродів 1,0 см<sup>2</sup> має менші розміри ділянки контролю порівняно з варіантом

1,5 см<sup>2</sup>: електроди 10 × 10 мм утворюють ділянку контролю об'ємом 0,30 мл, тоді як для 1,5 см<sup>2</sup> її довжина й об'єм збільшуються на 50 %. Розподіл поля порівняно в підрозділі 2.4, а опір виготовленого варіанта оцінено в підрозділі 4.5. Ці результати обґрунтовують конструктивний компроміс, але без оцінки повторюваності не встановлюють метрологічної переваги площі 1,0 см<sup>2</sup>.

## 4.2 Вплив компонентного складу палива на вихідний сигнал

Вихідний сигнал СМЯСП залежить від електричних властивостей палива в ділянці контролю. ДП складається переважно з вуглеводнів, тоді як біопаливо містить кисневмісні сполуки. Компонентний склад у цьому дослідженні задається об'ємною часткою біопалива  $B$ , а елементний склад характеризується масовими частками вуглецю, водню та кисню. Наведені нижче значення елементного складу використовують для пояснення відмінностей палив; вони не є результатом прямого вимірювання цих елементів розробленою системою [147].

Типові значення елементного складу (вміст вуглецю  $C$ , водню  $H$  та кисню  $O$ ) та густини для досліджуваних сумішей наведено в таблиці 4.2 [110].

Таблиця 4.2

Елементний склад і густина сумішевих палив

| Суміш | $B$ , % | $C$ , % мас. | $H$ , % мас. | $O$ , % мас. | Густина (15 °C),<br>кг/м <sup>3</sup> |
|-------|---------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|
| B0    | 0       | 86,5–87,0    | 13,0–13,5    | 0            | 830–845                               |
| B20   | 20      | 84,5–85,5    | 12,7–13,0    | 2,0–2,5      | 845–855                               |
| B50   | 50      | 81,5–83,0    | 12,3–12,6    | 5,0–5,5      | 855–870                               |
| B100  | 100     | 76,5–77,5    | 12,0–12,3    | 10,5–11,5    | 875–890                               |

Порівняння типового елементного складу сумішевих палив наведено на рисунку 4.11.

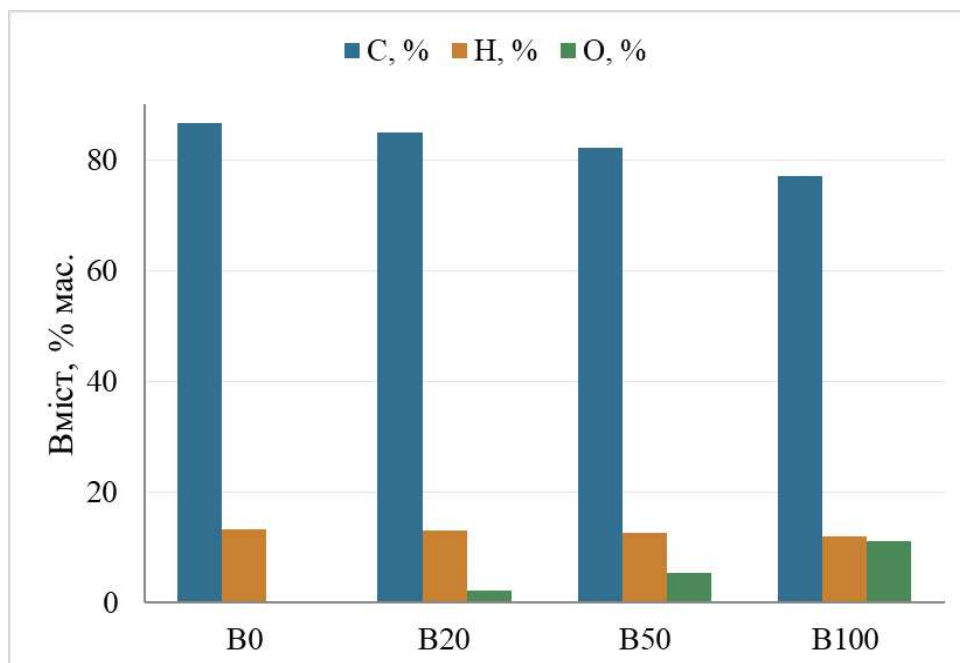


Рисунок 4.11 – Елементний склад сумішевих палив (вміст C, H, O)

Зміна частки біопалива в суміші супроводжується зміною її елементного складу та фізичних властивостей. Тому порівняння вмісту вуглецю, водню й кисню доповнено розглядом густини як характеристики досліджуваних палив. Для коректного зіставлення використано типові значення густини за однакової температури 15 °C, наведені на рисунку 4.12.

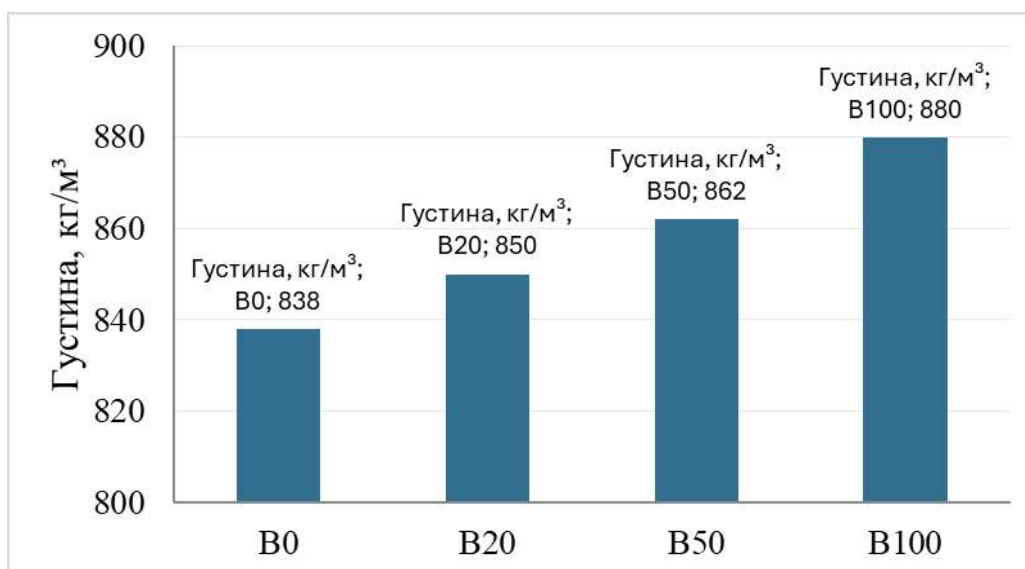


Рисунок 4.12 – Густина сумішевих палив при 15 °C

Наведені в таблиці 4.2 типові значення характеризують зменшення масової частки вуглецю приблизно від 87 до 77 %, збільшення масової частки

кисню від 0 до близько 11 % та підвищення густини зі збільшенням частки біопалива. Наявність кисневмісних сполук є одним із фізичних чинників відмінності електричних властивостей палив. У цьому експерименті компонентний склад змінювався разом із комплексом властивостей, тому внесок кисню окремо від густини та молекулярного складу не визначали.

Оскільки кисень є головною відмінністю елементного складу біопалива, доцільно розглянути залежність сигналу від вмісту О. На рис. 4.13 показано експериментальні значення  $U$  при  $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $A = 1,5\text{ см}^2$  для трьох рівнів частки біопалива.

У наведеному зіставленні кожному паливу відповідає сукупність характеристик: частка біопалива, типовий елементний склад і густина. Тому залежність на рисунку 4.13 пояснює зміну відгуку під час переходу між досліджуваними сумішами. Для побудови експериментальної моделі незалежним фактором залишається задана об'ємна частка біопалива, яку безпосередньо контролюють під час приготування проб.

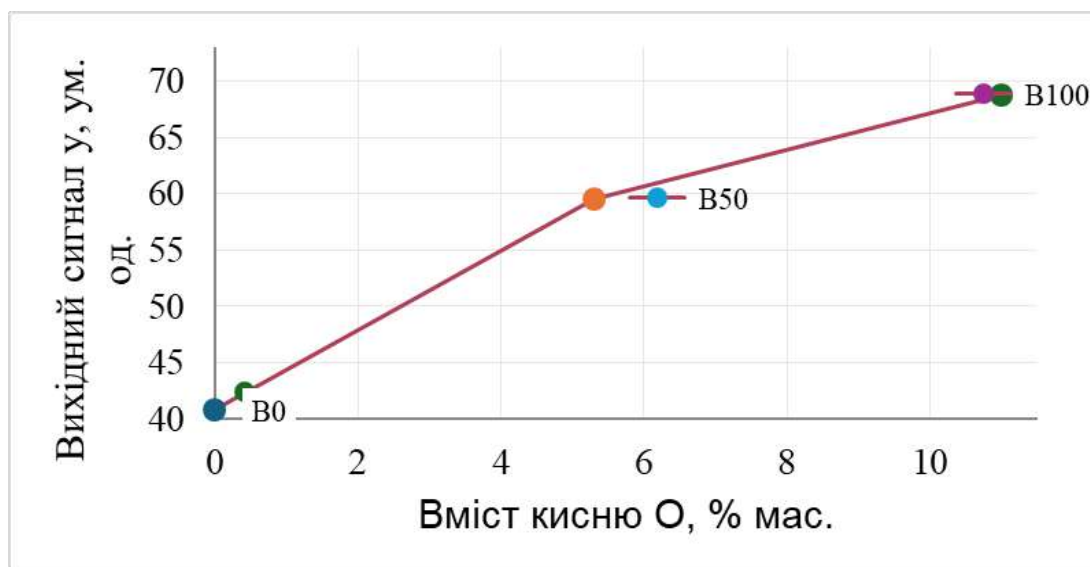


Рисунок 4.13 – Зв'язок вихідного сигналу з вмістом кисню в паливі ( $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A = 1,5\text{ см}^2$ )

За температури  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  та площі  $1,5\text{ см}^2$  перехід від B0 через B50 до B100 супроводжується зростанням сигналу від 40,76 через 59,56 до 68,81 ум. од. На рисунку ці значення зіставлено з типовим вмістом кисню для відповідних

складів. Таке зіставлення ілюструє зв'язок відгуку зі зміною складу палива, але не є незалежним градуванням за киснем.

Для порівняння на рисунку 4.14 наведено залежність вихідного сигналу від частки біопалива за площі електродів 1,5 см<sup>2</sup>.

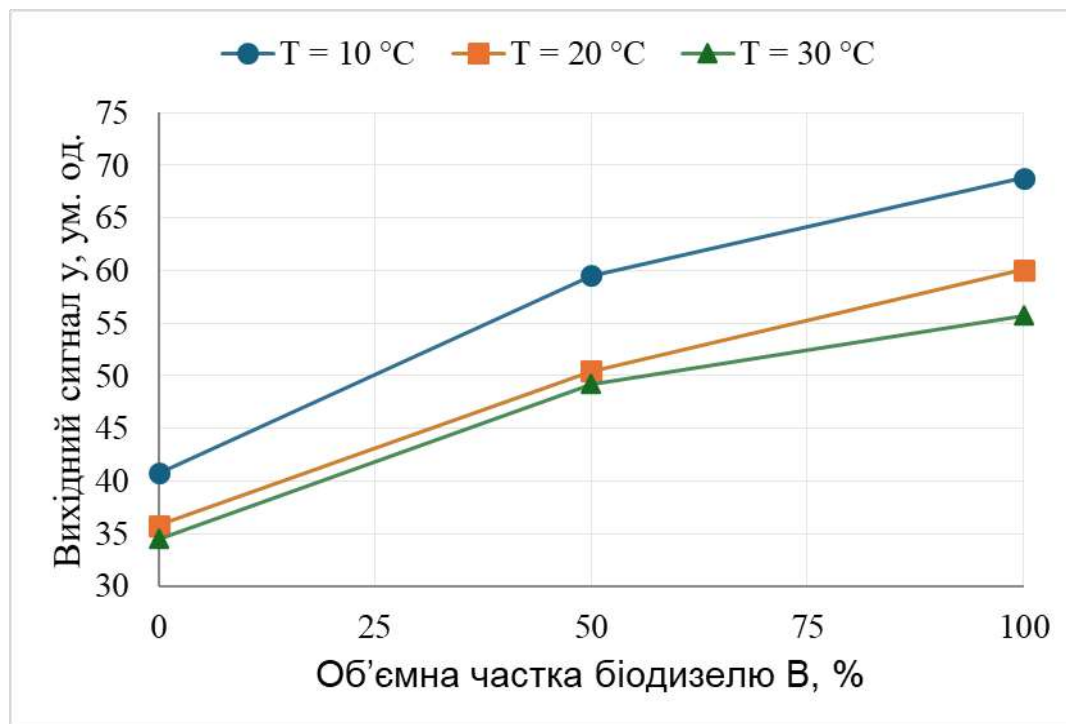


Рисунок 4.14 – Залежність  $\bar{y}$  від частки біопалива при  $A = 1,5 \text{ см}^2$

Різницю сигналів між біопаливом і ДП характеризують величиною:

$$\Delta \bar{y}_B = \bar{y}(B100, T, A) - \bar{y}(B0, T, A) \quad (4.1)$$

Розраховані значення  $\Delta \bar{y}_B$  наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

#### Зміна сигналу $\Delta \bar{y}_B$ (ум. од.) між B100 і B0

| $T, ^\circ\text{C}$ | $A = 0,5 \text{ см}^2$ | $A = 1,0 \text{ см}^2$ | $A = 1,5 \text{ см}^2$ |
|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 10                  | 14,41                  | 25,45                  | 28,05                  |
| 20                  | 9,15                   | 12,23                  | 24,31                  |
| 30                  | 2,34                   | 7,83                   | 21,22                  |

Залежність різниці вихідних сигналів для B100 і B0 від температури та площі електродів показано на рисунку 4.15.

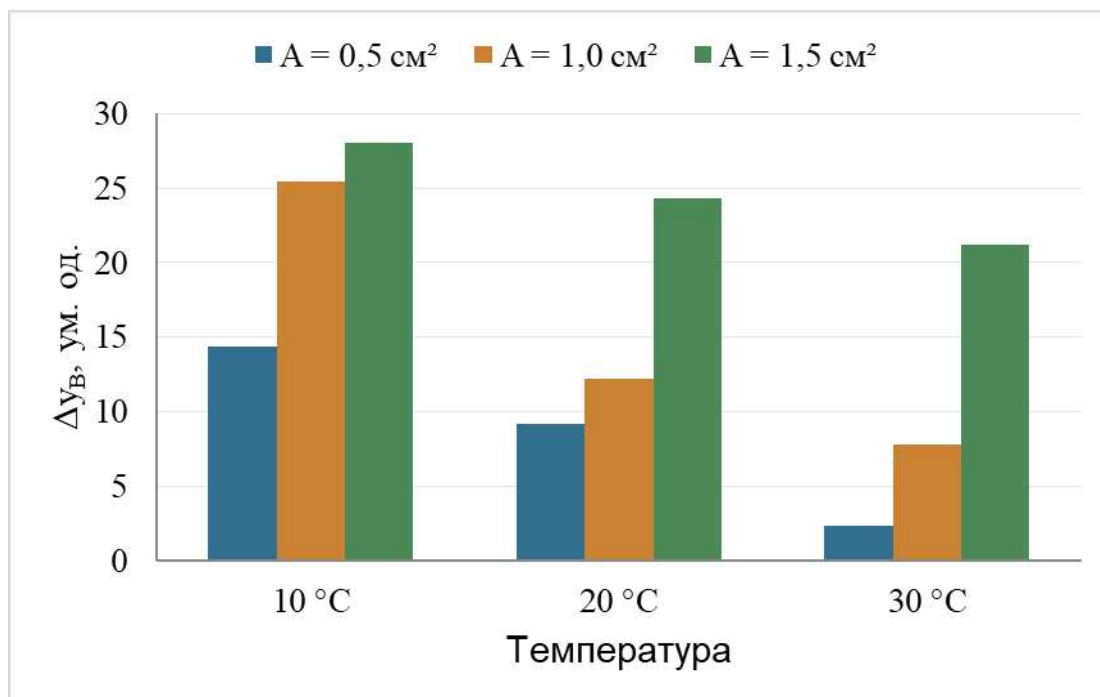


Рисунок 4.15 – Зміна сигналу  $\Delta y_B$  залежно від температури та площі електродів

Найбільший приріст середнього вихідного сигналу між B100 і B0 становить 28,05 ум. од. за температури 10 °C та площі електродів 1,5 см². З підвищенням температури різниця між складами зменшується. Величина  $\Delta y_B$  характеризує різницю середніх сигналів при зміні частки біопалива від 0 до 100 %. Для оцінювання середньої чутливості до частки біопалива цей приріст ділять на відповідну зміну B. Серед досліджених поєднань температури й площі електродів найбільша середня чутливість на інтервалі зміни частки біопалива 0–100 % становить 0,2805 ум. од./% за температури 10 °C та площі електродів 1,5 см².

#### 4.3 Побудова та оцінювання регресійної моделі базового сигналу СМЯСП

Для відтворення розрахунків використано збережене рівняння квадратичної моделі з коефіцієнтами, наведеними у презентації результатів дослідження. Кодування факторів відповідає залежностям (3.3)–(3.5). Прогнози за цими фіксованими коефіцієнтами зіставлено з 27 відновленими значеннями у

таблиці 4.1. Наведені коефіцієнти не є результатом повторного оцінювання методом найменших квадратів за відновленим набором. Пари значень  $y$  та  $\hat{y}$  наведено в таблиці Г.1.

Рівняння моделі в кодованих змінних зі збереженими коефіцієнтами наведено у формулі (4.2):

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 51,1024 + 8,4597 x_1 - 5,3529 x_2 + 5,8375 x_3 \\ & - 3,0483 x_1 x_2 + 4,7831 x_1 x_3 - 3,4461 x_2 x_3 \\ & - 5,0618 x_1^2 + 6,1398 x_2^2 - 6,6264 x_3^2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Коефіцієнти регресійної моделі та їх інтерпретацію наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

#### Коефіцієнти регресії та їх інтерпретація

| Коефіцієнт | Значення | Інтерпретація                                         |
|------------|----------|-------------------------------------------------------|
| $b_0$      | 51,1024  | Прогнозоване значення сигналу в центрі плану          |
| $b_1$      | +8,4597  | Сильний позитивний вплив частки біопалива $B$         |
| $b_2$      | -5,3529  | Негативний вплив температури $T$                      |
| $b_3$      | +5,8375  | Позитивний вплив площі електродів $A$                 |
| $b_{12}$   | -3,0483  | Негативна взаємодія $B \times T$                      |
| $b_{13}$   | +4,7831  | Сильна позитивна взаємодія $B \times A$               |
| $b_{23}$   | -3,4461  | Негативна взаємодія $T \times A$                      |
| $b_{11}$   | -5,0618  | Від'ємна кривизна залежності від частки біопалива $B$ |
| $b_{22}$   | +6,1398  | Квадратичний ефект $T$                                |
| $b_{33}$   | -6,6264  | Від'ємна кривизна залежності від площі електродів $A$ |

Коефіцієнт детермінації, розрахований як  $R^2 = 1 - SSE/SST$ , становить 0,8489;

Середньоквадратична похибка  $RMSE \approx 3,91$  ум. од., або 8,58 % від середнього сигналу 45,56136 ум. од.;

Максимальне абсолютне відхилення  $\approx 8,20$  ум. од.

Формальна підстановка значення  $R^2$  у співвідношення  $F = (R^2/9)/((1 - R^2)/17)$  дає 10,61. Еквівалентний запис через суми квадратів наведено у формулі (4.3):

$$F = \frac{\frac{SS_{reg}}{9}}{\frac{SS_{res}}{17}} = \frac{\frac{2318,2824}{9}}{\frac{412,7740}{17}} = 10,61, \quad (4.3)$$

де  $SS_{res} = 412,7740$  – сума квадратів різниць між відновленими значеннями у та прогнозами  $\hat{y}$ ;  $SST = 2731,0564$  – сума квадратів відхилень у від середнього;  $SS_{reg}$  у цьому формальному розрахунку визначено як  $SST - SS_{res} = 2318,2824$ . Числа 9 і 17 відповідають дев'яти членам моделі без вільного члена та різниці між 27 точками й 10 коефіцієнтами. Значення  $F = 10,61$  не використано для висновку про статистичну значущість моделі: її коефіцієнти за цим набором методом найменших квадратів не оцінювали.

Для візуалізації залежності вихідного сигналу від факторів у програмі OriginPro побудовано поверхні відгуку з контурними проєкціями. Поверхні відображають розрахунковий вихідний сигнал  $\hat{Y}$  у первинній шкалі, в умовних одиницях. Експериментальні дані наведено в таблиці 4.1, коефіцієнти моделі – у таблиці 4.4, а код побудови поверхонь із використанням цих коефіцієнтів – у додатку Д. Нормування  $\hat{Y}$  до шкали 1–100 ум. од. за формулою (3.17) є окремим перетворенням і до наведених поверхонь не застосоване.

#### **Поверхні $\hat{Y} = f(x_1, x_2)$ при фіксованому $x_3$**

На рис. 4.16 представлено поверхні відгуку залежно від частки біопалива та температури при різних значеннях площі електродів.

Форма поверхонь залежить від спільного впливу частки біопалива, температури та площі електродів. Збільшення площі підвищує прогнозований сигнал насамперед за високої частки біопалива; за низької частки квадратичний член моделі може формувати максимум усередині діапазону площі. Поверхні слід порівнювати в межах досліджених рівнів факторів.

За площі  $1,0 \text{ см}^2$  підвищення температури від  $10$  до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  знижує сигнал B100 на  $18,30$  ум. од., тоді як для B0 різниця між крайніми температурами становить  $0,68$  ум. од. Відмінність характеризує залежність температурного впливу від компонентного складу.

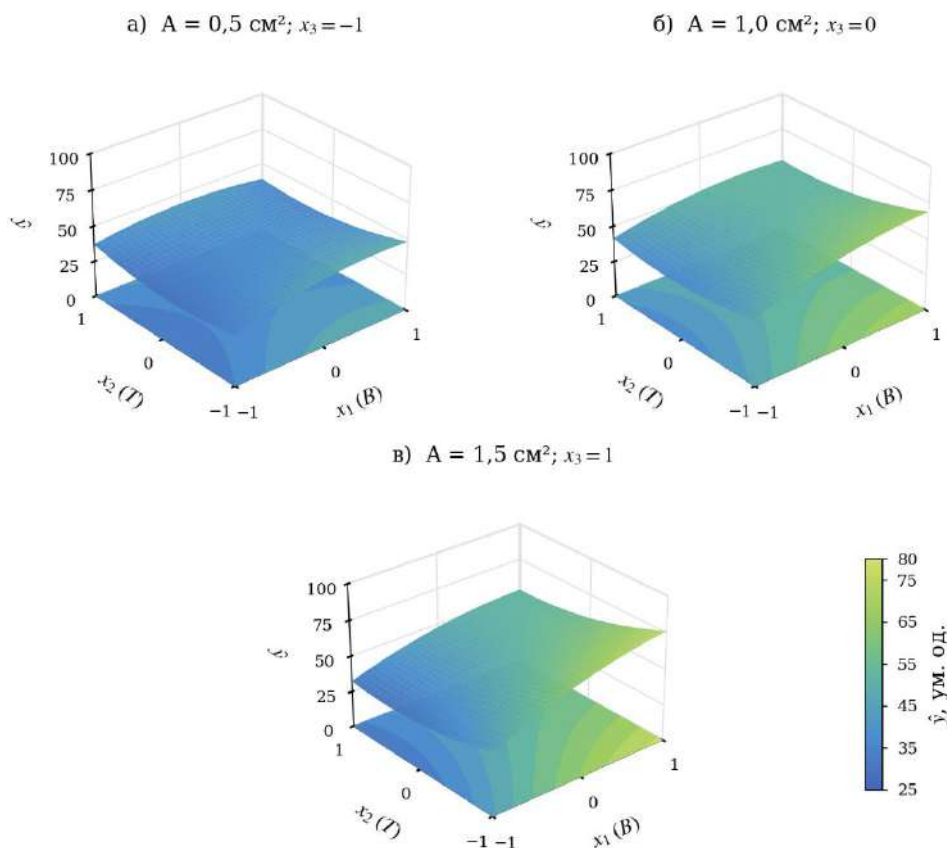


Рисунок 4.16 – Поверхні відгуку  $\hat{y} = f(x_1, x_2)$  при фіксованих значеннях  $x_3$  (A)

### Поверхні $\hat{y} = f(x_1, x_3)$ при фіксованому $x_2$

За високої частки біопалива найбільші значення сигналу відповідають нижньому рівню температури. За низької частки температурна залежність має виражену кривизну, тому зниження поверхні зі зростанням температури не є однаковим для всього факторного простору. Додатний коефіцієнт взаємодії  $x_1 x_3$  характеризує посилення впливу площі зі збільшенням частки біопалива.

Для B100 збільшення площі від  $0,5$  до  $1,5 \text{ см}^2$  підвищує сигнал на  $22,55$  ум. од. при  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  та на  $19,03$  ум. од. при  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отже, приріст відгуку від збільшення електродів залежить від температури палива. Під час конструктивного вибору цей приріст зіставляють зі збільшенням довжини й

об'єму ділянки контролю, а найбільше значення сигналу розглядають разом з іншими характеристиками датчика.

Поверхні відгуку залежно від частки біопалива та площі електродів за фіксованих значень температури наведено на рисунку 4.17.

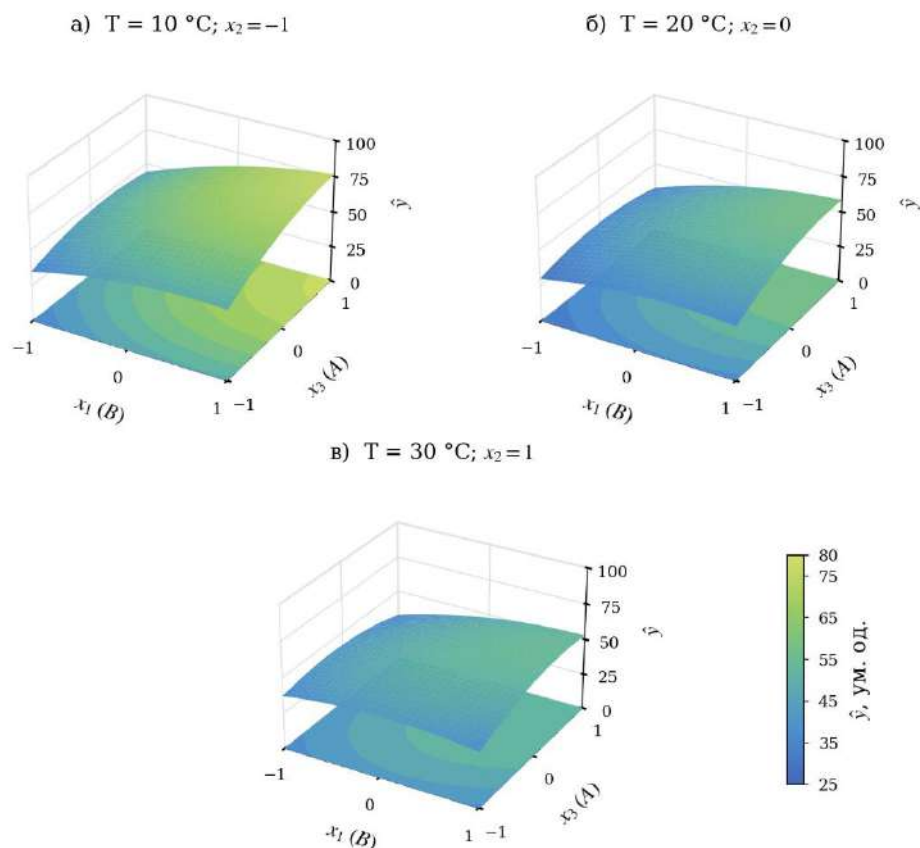


Рисунок 4.17 – Поверхні відгуку  $\hat{y} = f(x_1, x_3)$  при фіксованих значеннях  $x_2$  ( $T$ )

### Поверхні $\hat{y} = f(x_2, x_3)$ при фіксованому $x_1$

Для В0 зміна прогнозованого сигналу зі зміною температури та площі електродів менш виражена, ніж для В100, що відображається в меншому перепаді висот відповідної поверхні відгуку. Для В100 вплив цих факторів посилюється: більші значення сигналу відповідають нижчій температурі та більшій площі електродів. Найбільший експериментальний сигнал серед досліджених режимів становить 68,81 ум. од. за температури 10 °C та площі електродів 1,5 см<sup>2</sup>. Відмінності форми поверхонь свідчать про залежність температурного й геометричного впливів від компонентного складу палива.

Лінії однакового відгуку показують, що близьке значення сигналу може відповідати різним поєднанням температури та площі електродів. Їх розташування дає змогу визначити, як зміна одного фактора може компенсувати вплив іншого, а відстань між ізолініями характеризує інтенсивність зміни прогнозованого сигналу.

Поверхні відгуку залежно від температури та площі електродів за фіксованих значень частки біопалива наведено на рисунку 4.18.

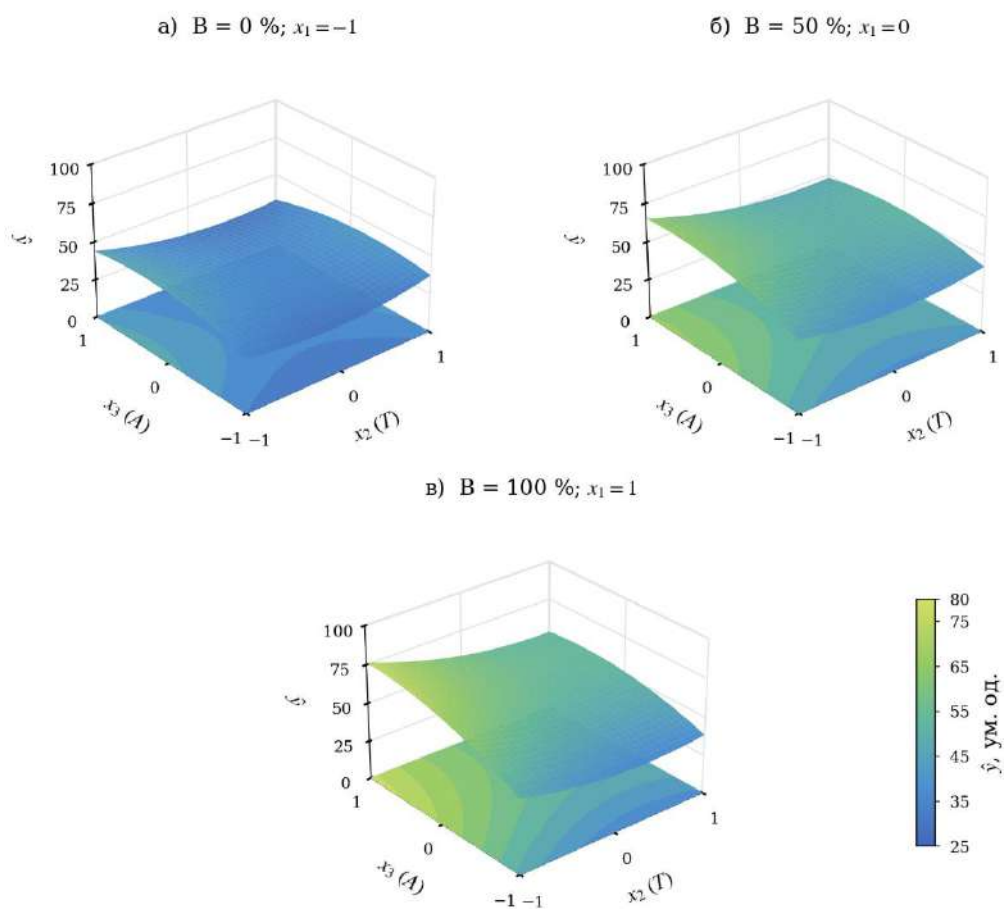


Рисунок 4.18 – Поверхні відгуку  $\hat{y} = f(x_2, x_3)$  при фіксованих значеннях  $x_1$  ( $B$ )

Контурні проєкції на поверхнях відгуку (рис. 4.16, 4.17, 4.18) відображають лінії однакових прогнозованих значень сигналу та дають змогу зіставляти вплив двох факторів за фіксованого третього. За розміщенням ізоліній визначають області більшого й меншого відгуку в дослідженому діапазоні.

Для ранжування досліджених режимів за значенням вихідного сигналу введено нормований критерій  $A_u$ . Він характеризує віддаленість від найбільшого сигналу в дослідженому діапазоні та не є самостійним багатокритеріальним показником оптимальності конструкції:

$$A_u = \frac{y_{\max} - y_u}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (4.4)$$

де  $y_u$  – вихідний сигнал для  $u$ -го дослід;  $u$  – номер дослід;  $y_{\max} = 68,81$  ум. од. (дослід № 21);  $y_{\min} = 31,18$  ум. од. (дослід № 4). Менше  $A_u$  відповідає більшому сигналу; при  $A_u = 0$  досягається найбільше зареєстроване значення. Цей критерій застосовують разом із вимогами до повторюваності, геометрії та пропускної здатності датчика. Значення вихідного сигналу та нормованого критерію  $A_u$  для всіх 27 дослідів наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

#### Результати експерименту з узагальненим критерієм

| №  | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $B, \%$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $A, \text{см}^2$ | $y$      | $A_u$  |
|----|-------|-------|-------|---------|---------------------|------------------|----------|--------|
| 1  | -1    | -1    | -1    | 0       | 10                  | 0,5              | 31,84416 | 0,9823 |
| 2  | -1    | -1    | 0     | 0       | 10                  | 1,0              | 37,82895 | 0,8233 |
| 3  | -1    | -1    | 1     | 0       | 10                  | 1,5              | 40,75870 | 0,7454 |
| 4  | -1    | 0     | -1    | 0       | 20                  | 0,5              | 31,17880 | 1,0000 |
| 5  | -1    | 0     | 0     | 0       | 20                  | 1,0              | 38,56656 | 0,8037 |
| 6  | -1    | 0     | 1     | 0       | 20                  | 1,5              | 35,77555 | 0,8778 |
| 7  | -1    | 1     | -1    | 0       | 30                  | 0,5              | 34,35837 | 0,9155 |
| 8  | -1    | 1     | 0     | 0       | 30                  | 1,0              | 37,15216 | 0,8412 |
| 9  | -1    | 1     | 1     | 0       | 30                  | 1,5              | 34,51204 | 0,9114 |
| 10 | 0     | -1    | -1    | 50      | 10                  | 0,5              | 43,24210 | 0,6794 |
| 11 | 0     | -1    | 0     | 50      | 10                  | 1,0              | 58,88440 | 0,2637 |
| 12 | 0     | -1    | 1     | 50      | 10                  | 1,5              | 59,56281 | 0,2456 |
| 13 | 0     | 0     | -1    | 50      | 20                  | 0,5              | 41,88481 | 0,7155 |
| 14 | 0     | 0     | 0     | 50      | 20                  | 1,0              | 48,46938 | 0,5405 |
| 15 | 0     | 0     | 1     | 50      | 20                  | 1,5              | 50,46094 | 0,4875 |

| №         | $x_1$    | $x_2$     | $x_3$    | $B, \%$    | $T, ^\circ\text{C}$ | $A, \text{cm}^2$ | $y$             | $A_u$         |
|-----------|----------|-----------|----------|------------|---------------------|------------------|-----------------|---------------|
| 16        | 0        | 1         | -1       | 50         | 30                  | 0,5              | 39,85224        | 0,7695        |
| 17        | 0        | 1         | 0        | 50         | 30                  | 1,0              | 49,61361        | 0,5101        |
| 18        | 0        | 1         | 1        | 50         | 30                  | 1,5              | 49,24932        | 0,5197        |
| 19        | 1        | -1        | -1       | 100        | 10                  | 0,5              | 46,25377        | 0,5994        |
| 20        | 1        | -1        | 0        | 100        | 10                  | 1,0              | 63,27676        | 0,1469        |
| <b>21</b> | <b>1</b> | <b>-1</b> | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>10</b>           | <b>1,5</b>       | <b>68,80589</b> | <b>0,0000</b> |
| 22        | 1        | 0         | -1       | 100        | 20                  | 0,5              | 40,33061        | 0,7568        |
| 23        | 1        | 0         | 0        | 100        | 20                  | 1,0              | 50,79607        | 0,4786        |
| 24        | 1        | 0         | 1        | 100        | 20                  | 1,5              | 60,08699        | 0,2317        |
| 25        | 1        | 1         | -1       | 100        | 30                  | 0,5              | 36,70119        | 0,8532        |
| 26        | 1        | 1         | 0        | 100        | 30                  | 1,0              | 44,97862        | 0,6332        |
| 27        | 1        | 1         | 1        | 100        | 30                  | 1,5              | 55,73203        | 0,3475        |

*Примітка: жирним виділено дослід із найбільшим вихідним сигналом (№ 21).*

За критерієм  $A_u$  виконано ранжування досліджених режимів за величиною вихідного сигналу. Результати наведено в таблиці 4.6.

*Таблиця 4.6*

**Ранжування досліджених режимів за величиною вихідного сигналу**

| Ранг | №  | $B, \%$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $A, \text{cm}^2$ | $y$      | $A_u$  |
|------|----|---------|---------------------|------------------|----------|--------|
| 1    | 21 | 100     | 10                  | 1,5              | 68,80589 | 0,0000 |
| 2    | 20 | 100     | 10                  | 1,0              | 63,27676 | 0,1469 |
| 3    | 24 | 100     | 20                  | 1,5              | 60,08699 | 0,2317 |
| 4    | 12 | 50      | 10                  | 1,5              | 59,56281 | 0,2456 |
| 5    | 11 | 50      | 10                  | 1,0              | 58,88440 | 0,2637 |

Найбільший вихідний сигнал отримано в досліді № 21 ( $A_u = 0$ ): частка біопалива 100 %, температура 10 °C, площа електродів 1,5 см². Значення  $y$  становить 68,81 ум. од.

#### 4.4 Оцінювання інформативності, стабільності, однозначності та чутливості вихідного сигналу

Для кількісного оцінювання сигналу використано основний набір таблиці 4.1 та окремі повторні й часові серії. Опорний режим:  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A = 1,0\text{ см}^2$ ,  $d = 3\text{ мм}$ . Чутливість за зміною складу обчислено за таблицею 4.1, інформативність і повторюваність – за таблицею 4.7, короткочасну стабільність – за таблицею 4.9. Результати цих серій не ототожнюють. Усі показники стосуються первинної шкали; нормування за формулою (3.17) є окремим перетворенням.

##### Інформативність щодо розрізнення досліджених складів

В окремих повторних серіях таблиці 4.7 середні сигнали B0, B50 і B100 становлять відповідно 35,44; 50,90 та 53,98 ум. од. Ці серії використано для оцінювання повторюваності та попарного розрізнення середніх; їхні середні не є значеннями відновленого набору таблиці 4.. Номери показів належать до окремих серій і не означають парності вимірювань між складами.

Таблиця 4.7

##### Результати повторних вимірювань та статистичні характеристики вихідного сигналу

| Показник             | B0, ум. од. | B50, ум. од. | B100, ум. од. |
|----------------------|-------------|--------------|---------------|
| 1                    | 35,04       | 50,30        | 53,48         |
| 2                    | 35,24       | 50,60        | 53,73         |
| 3                    | 35,44       | 50,90        | 53,98         |
| 4                    | 35,64       | 51,20        | 54,23         |
| 5                    | 35,84       | 51,50        | 54,48         |
| Середнє $\bar{y}$    | 35,44       | 50,90        | 53,98         |
| Відхилення $s$       | 0,316       | 0,474        | 0,395         |
| Невизначеність $u_A$ | 0,141       | 0,212        | 0,177         |

Для незалежних серій за припущення приблизної нормальності розподілу визначено попарні 95 % довірчі інтервали різниць середніх за методом Велча. Вони враховують повторюваність; спільний рівень довіри для трьох порівнянь

не заявляється. Напівширину інтервалу позначено  $h$ ; вона не є повною розширеною невизначеністю системи. Різниці середніх сигналів та характеристики відповідних попарних довірчих інтервалів наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

**Різниці між середніми значеннями та довірчі інтервали для них**

| Порівняння | $\Delta\bar{y}$ , ум. од. | $u_A(\Delta\bar{y})$ , ум. од. | $h$ , ум. од. | 95 % інтервал, ум. од. |
|------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| B50 – B0   | 15,46                     | 0,255                          | 0,603         | 14,857–16,063          |
| B100 – B50 | 3,08                      | 0,276                          | 0,640         | 2,440–3,720            |
| B100 – B0  | 18,54                     | 0,226                          | 0,526         | 18,014–19,066          |

Для узагальнення наведених попарних порівнянь вводять безрозмірний показник запасу розрізнення середніх  $K_{\text{інф}}$ . Його визначають як найменше серед усіх розглянутих пар відношення модуля різниці середніх сигналів до напівширини відповідного довірчого інтервалу за формулою (4.5):

$$K_{\text{інф}} = \min \frac{|\Delta\bar{y}_{ij}|}{h_{ij}}, \quad (4.5)$$

де  $\Delta\bar{y}_{ij}$  – різниця середніх сигналів  $i$ -ї та  $j$ -ї серій, ум. од.;  $h_{ij}$  – напівширина попарного 95 % довірчого інтервалу цієї різниці, ум. од., визначена за методом Велча. Мінімум визначають за всіма розглянутими парами за умови  $h_{ij} > 0$ . Умова  $K_{\text{інф}} > 1$  означає, що кожен із відповідних попарних довірчих інтервалів не містить нуля. Показник характеризує запас розрізнення середніх за заданих умов і прийнятих статистичних припущень; він не є універсальною мірою інформації та не визначає ймовірності правильної класифікації за одиничним показом.

$$K_{\text{інф}} \approx \min \left\{ \frac{15,46}{0,603}; \frac{3,08}{0,640}; \frac{18,54}{0,526} \right\} = 4,81 \quad (4.6)$$

Результат обчислено за неокругленими значеннями та подано з округленням до сотих. Найменший запас відповідає парі B100–B50. Умова  $K_{\text{інф}} > 1$  означає, що всі розглянуті попарні інтервали не містять нуля. Результат

характеризує розрізнення середніх за заданих умов і не підтверджує класифікацію за одиничним показом або селективне визначення домішок. Графічне подання різниць середніх сигналів та відповідних попарних 95 % довірчих інтервалів наведено на рисунку 4.19.

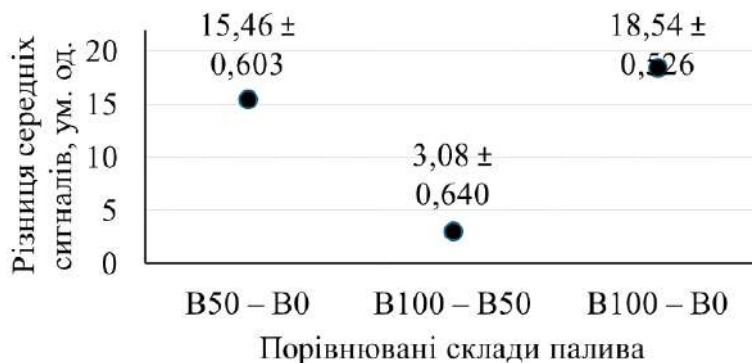


Рисунок 4.19 – Різниці середніх сигналів та попарні 95 % довірчі інтервали за повторюваністю при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A = 1,0\text{ см}^2$  і  $d = 3\text{ мм}$

#### Короткочасна стабільність вихідного сигналу

Для складу B50 окремо розглянуто часову серію з 11 показів на інтервалі 0–10 хв із кроком реєстрації 1 хв. Початковий сигнал дорівнює 50,90 ум. од. Часову серію наведено в таблиці 4.9, її графічне подання – на рисунку 4.20.

Таблиця 4.9

#### Зміна вихідного сигналу для паливної суміші B50 протягом 10 хв

| Час, хв | Сигнал, ум. од. |
|---------|-----------------|
| 0       | 50,90           |
| 1       | 51,40           |
| 2       | 50,40           |
| 3       | 51,90           |
| 4       | 49,90           |
| 5       | 51,10           |
| 6       | 50,70           |
| 7       | 51,70           |
| 8       | 50,10           |
| 9       | 52,10           |
| 10      | 49,70           |

Для часової серії тривалістю 10 хв позначення  $D_{10}$  відповідає відносному максимальному відхиленню  $D_{\text{відн}}$ , визначеному за формулою (3.16) на цьому інтервалі.

Основним числовим показником короточасної стабільності прийнято максимальне відносне відхилення від початкового показу  $D_{10}$  за формулою (4.7); результат розрахунку наведено у формулі (4.8). Менше значення відповідає меншій зміні сигналу за час спостереження.

$$D_{10} = \max \frac{|y(t) - y(0)|}{|y(0)|} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

$$D_{10} = \frac{1,20}{50,90} \cdot 100 \% = 2,36 \% \quad (4.8)$$

Середній сигнал дорівнює 50,90 ум. од.; мінімальний і максимальний покази становлять 49,70 та 52,10 ум. од. Розмах дорівнює 2,40 ум. од., або 4,72 % від середнього. Зміна кінцевого показу відносно початкового становить  $-1,20$  ум. од. і сама по собі не доводить систематичного дрейфу.



Рисунок 4.20 – Часова зміна сигналу B50 протягом 10 хв при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A = 1,0\text{ см}^2$  і  $d = 3\text{ мм}$

### Однозначність залежності сигналу від частки біопалива

Однозначність оберненого визначення частки біопалива за сигналом перевіряють за монотонністю регресійної залежності  $\hat{y}(B, T, A)$  за фіксованих температури, площі електродів та відстані між ними. Для цього визначають

локальну чутливість як частинну похідну прогнозованого сигналу за часткою біопалива:  $S_{B, \text{лок}} = \frac{\partial \hat{y}(B, T, A)}{\partial B}$ .

де  $S_{B, \text{лок}}$  – локальна чутливість у первинній шкалі, ум. од./%;  $\hat{y}$  – прогнозований вихідний сигнал, ум. од.;  $B$  – частка біопалива, %. Додатна похідна на інтервалі означає зростання залежності, від’ємна – спадання. Межі монотонних гілок установлюють за коренями рівняння  $\partial \hat{y} / \partial B = 0$  та перевіркою знака похідної між ними.

Розраховані межі монотонних гілок характеризують модель (4.2) зі збереженими коефіцієнтами за фіксованих температури та площі електродів. Зростання сигналів лише в окремих точках не доводить монотонності між ними.

Для числової перевірки використано коефіцієнти квадратичної регресії, наведені в таблиці 4.4 та рівнянні (4.2);  $x_1 = (B - 50)/50$ ,  $x_2 = (T - 20)/10$ ,  $x_3 = (A - 1,0)/0,5$ .

За  $T = 20$  °C та  $A = 1,0$  см<sup>2</sup> маємо  $x_2 = x_3 = 0$ , тому модель спрощується до залежності (4.9):

$$\hat{y} = 51,1024 + 8,4597x_1 - 5,0618x_1^2 \quad (4.9)$$

Локальну чутливість визначено диференціюванням залежності (4.9) за часткою біопалива. Похідну наведено у формулі (4.10), а її значення на межах діапазону – у формулах (4.11) і (4.12):

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial B} = \frac{8,4597 - 10,1236x_1}{50} \quad (4.10)$$

$$B = 0 \%: \frac{\partial \hat{y}}{\partial B} = 0,37167 \text{ ум. од./\%} \quad (4.11)$$

$$B = 100 \%: \frac{\partial \hat{y}}{\partial B} = -0,03328 \text{ ум. од./\%} \quad (4.12)$$

Зміна знака похідної свідчить, що модель не є монотонною на всьому інтервалі 0–100 %. Розрахункову межу зростаючої гілки визначають з умови нульової похідної за формулами (4.13) і (4.14):

$$x_1^* = \frac{8,4597}{10,1236} = 0,83564 \quad (4.13)$$

$$B^* = 50 + 50 \cdot 0,83564 \approx 91,78 \% \quad (4.14)$$

За рівнянням (4.2) модель зростає на інтервалі  $B = 0-91,78 \%$  та спадає на інтервалі  $B = 91,78-100 \%$ . Межа зростаючої гілки становить  $B^* \approx 91,78 \%$ . Розрахунок виконано за коефіцієнтами таблиці 4.4; похідну й межу гілки у формулах округлено. Кожна гілка допускає однозначне обернення лише за попередньо відомої належності до неї; весь інтервал  $0-100 \%$  однозначного обернення не забезпечує.

### **Чутливість до зміни частки біопалива**

Середню чутливість визначають як відношення різниці середніх сигналів до зміни  $B$  за незмінних  $T$  та  $A$  за формулою (4.15). Позначення ум. од./% означає зміну сигналу на одиницю шкали  $B$ , заданої у відсотках, а не відносне збільшення  $B$  на  $1 \%$  від його поточного значення.

$$S = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{B_2 - B_1} \quad (4.15)$$

За таблицею 4.1 сигнали  $B_0$ ,  $B_{50}$  і  $B_{100}$  в опорному режимі становлять 38,57; 48,47 та 50,80 ум. од. Розраховані до округлення середні чутливості на інтервалах  $0-50 \%$ ,  $50-100 \%$  та  $0-100 \%$  наведено в таблиці 4.10.

*Таблиця 4.10*

### **Середня чутливість при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ та $A = 1,0 \text{ см}^2$**

| Інтервал $B$ , % | Приріст сигналу, ум. од. | Зміна $B$ , % | Середня чутливість, ум. од./% |
|------------------|--------------------------|---------------|-------------------------------|
| 0–50             | 9,90                     | 50            | 0,1981                        |
| 50–100           | 2,33                     | 50            | 0,0465                        |
| 0–100            | 12,23                    | 100           | 0,1223                        |

Середня чутливість на інтервалі  $0-100 \%$  становить 0,1223 ум. од./%. На інтервалах  $0-50 \%$  та  $50-100 \%$  отримано відповідно 0,1981 та 0,0465 ум. од./%. Відношення цих значень до округлення дорівнює приблизно 4,26, тобто в другому інтервалі середня чутливість у 4,26 раза менша. Додатна середня чутливість не виключає локального максимуму моделі всередині інтервалу.

### Повторюваність і підсумкові показники

Додатково для трьох окремих повторних серій таблиці 4.7 оцінено коефіцієнт варіації  $CV = s/\bar{y} \cdot 100 \%$ . За неокругленими стандартними відхиленнями отримано  $CV(B0) = 0,89 \%$ ,  $CV(B50) = 0,93 \%$ ,  $CV(B100) = 0,73 \%$ . Максимальне значення становить  $0,93 \%$  і характеризує повторюваність поданих серій, а не стабільність у часі. Числові характеристики інформативності, короткочасної стабільності, однозначності, чутливості та повторюваності вихідного сигналу узагальнено в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

#### Узагальнення числових характеристик СМЯСП

| Характеристика  | Показник                                                           | Результат        |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|------------------|
| Інформативність | Мінімальний запас розрізнення середніх Кінф за серіями таблиці 4.7 | 4,81             |
| Стабільність    | Максимальне відносне відхилення D10 за часовою серією таблиці 4.9  | 2,36 %           |
| Однозначність   | Розрахункова межа зростаючої гілки В*                              | 91,78 %          |
| Чутливість      | Середня на інтервалі В0–В100 за таблицею 4.1                       | 0,1223 ум. од./% |
| Повторюваність  | Максимальний CV повторних серій таблиці 4.7                        | 0,93 %           |

Наведені в таблиці 4.11 показники мають різний зміст і не зводяться до єдиної оцінки якості палива. Кожен із них характеризує окремий аспект роботи СМЯСП: здатність розрізняти зміни вихідного сигналу, відтворювати результати за незмінних умов або зберігати стабільність показів у часі. Їх сукупний розгляд дає змогу оцінити можливості та обмеження системи в

досліджених режимах, однак не замінює визначення фізико-хімічних властивостей палива та перевірки його відповідності нормативним вимогам.

#### **4.5 Обґрунтування та перевірка встановлення СМЯСП у паливній системі трактора «Булат 244»**

Для перевірки монтажної придатності СМЯСП обрано мінітрактор «Булат 244» із трициліндровим дизельним двигуном КМ385ВТ потужністю 24 к.с. Паливну систему та місце встановлення ДДП наведено на рисунку 4.21. Двигун має механічне безпосереднє впорскування; тиск, дозування та момент подавання палива забезпечує механічний ПНВТ.

Механічні домішки спричиняють абразивне зношування насоса й форсунок, вода сприяє корозії, а продукти старіння утворюють відкладення та засмічують систему [148]. Вибір проточного встановлення обґрунтовано порівнянням способів розміщення датчика: проточного – усього потоку палива через ділянку контролю; байпасного – відведення частини потоку через датчик; занурного – контролю локального стану палива в баку або відстійнику.

Для розробленої СМЯСП обрано проточне встановлення ДДП між паливним фільтром і ПНВТ (рисунок 4.21), що забезпечує контроль палива після фільтрації перед надходженням до паливної апаратури. ЕБ розміщують поза проточною ділянкою та з'єднують із ДДП сигнальним кабелем.

Конструкція фільтра та ефективність відокремлення води й частинок впливають на стан палива в ділянці контролю [149, 150, 151]. Датчик реєструє стан палива на виході фільтра; оцінювання ефективності самого фільтра до його вимірювальної функції не належить.

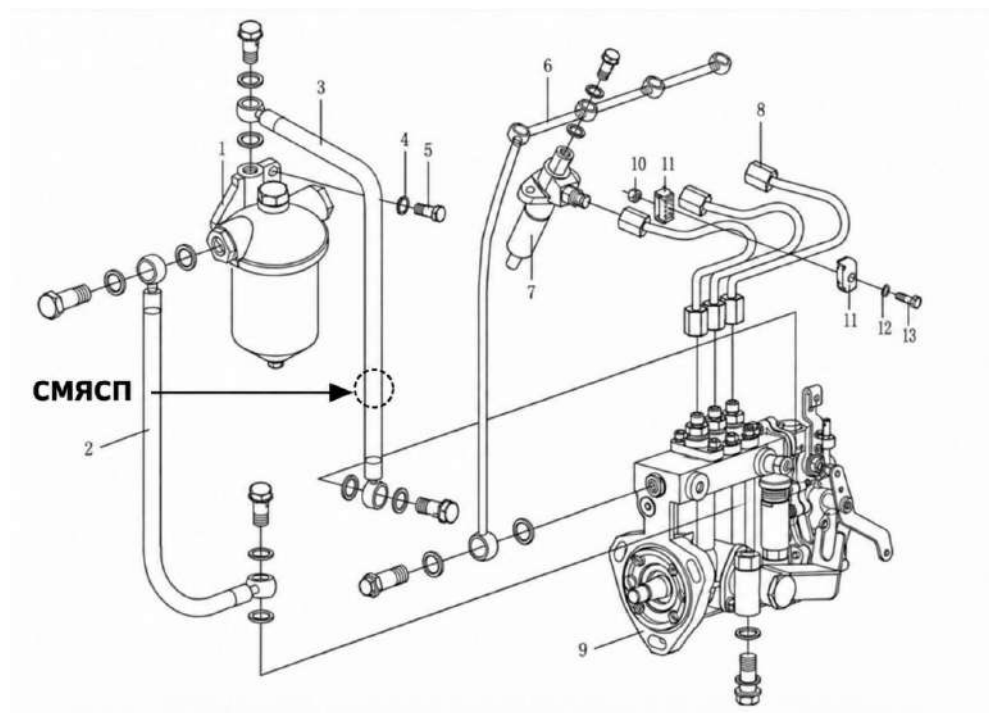


Рисунок 4.21 – Паливна система дизельного двигуна КМ385ВТ трактора «Булат 244»; стрілкою позначено місце встановлення СМЯСП в системі живлення: 1 – паливний фільтр; 2 – трубопровід від підкачувального насоса до паливного фільтра; 3 – трубопровід від паливного фільтра до ПНВТ; 4 – шайба 8; 5 – болт М8×25; 6 – трубопровід зворотного відведення палива; 7 – паливна форсунка; 8 – паливопроводи високого тиску; 9 – триплунжерний ПНВТ типу ВQ; 10 – гайка М6; 11 – затискач паливопроводів високого тиску; 12 – шайба 6; 13 – гвинт М6×30.

Паливо з бака підкачувальним насосом подається трубопроводом 2 до фільтра 1. Після очищення воно трубопроводом 3 надходить до ПНВТ 9, який дозує та подає його паливопроводами 8 до форсунок 7 трьох циліндрів. Форсунки розпилюють паливо безпосередньо в камери згоряння, а його надлишок відводиться трубопроводом 6 у зворотну магістраль.

Для оцінювання додаткового гідравлічного опору ДДП визначено перепад тиску в його проточній частині за прийнятих розрахункових витрат палива. Перевірка умови (2.19) потребує визначення допустимого перепаду тиску для обраної ділянки системи живлення та фактичної витрати палива через датчик. Номінальний тиск у паливній магістралі не замінює допустимого

перепаду тиску на ДДП. За технічними даними насоса підкачки палива для двигунів цього класу номінальний робочий тиск ділянки низького тиску прийнято  $P_{\text{ном}} = 0,14$  МПа (140 кПа).

Геометричні параметри проточної частини ДДП відповідають конструктивному опису підрозділу 3.2: ширина каналу  $b = 10$  мм, відстань між електродами  $d = 3$  мм, площа поперечного перерізу  $S_k = 30$  мм<sup>2</sup>, довжина ділянки контролю (за номінальної площі електродів ДДП  $A = 1,0$  см<sup>2</sup>)  $L = 10$  мм, внутрішній об'єм ділянки контролю  $V_k = 0,30$  мл. Периметр перерізу становить  $P_{\text{зм}} = 2(b + d) = 26$  мм, звідки за формулою (2.17) гідравлічний діаметр каналу  $D_r = \frac{4S_k}{P_{\text{зм}}} \approx 4,6$  мм.

Для оцінювання максимальної потреби трактора «Булат 244» у паливі розрахунковим режимом прийнято роботу двигуна КМ385ВТ за повного навантаження з використанням номінальної потужності. За прийнятих у розрахунку значень потужності  $N_e = 17,9$  кВт, питомої витрати палива  $g_e \approx 245$  г/(кВт·год) і густини  $\rho \approx 840$  кг/м<sup>3</sup> годинне споживання за співвідношенням потужності, питомої витрати й густини [152] становить  $Q_r = \frac{N_e \cdot g_e}{\rho} \approx 5,2$  л/год.

Отже, 5,2 л/год є розрахунковим орієнтиром споживання за повного навантаження. Гідравлічний опір датчика оцінено в діапазоні  $Q = 1\text{--}10$  л/год, верхня межа якого перевищує це значення приблизно в 1,9 раза. Такий вибір діапазону дає змогу зіставити характеристики датчика з потребою двигуна в паливі за найбільшого прийнятого навантаження.

Розрахункове споживання двигуном і витрата через конкретну ділянку паливної магістралі є різними величинами: остання залежить від схеми подавання та повернення палива. В акумуляторних системах керування паливopoдачею пов'язане також із втратами на привод насоса [153].

Для порівняння обох моделей прийнято однакові властивості палива:  $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup> і  $\mu = 0,0036$  Па·с, як зазначено на рисунку 4.22; відповідно  $\nu = \frac{\mu}{\rho} \approx 4,286 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Це фіксовані розрахункові значення, а не залежність в'язкості

від температури. Середню швидкість визначено за формулою (2.16), число Рейнольдса – за (4.16). У діапазоні 1–10 л/год одержано  $Re \approx 10–100$ . Для прямокутного каналу коефіцієнт тертя Дарсі визначено з поправкою на співвідношення сторін  $\alpha = \frac{d}{b} = 0,3$  за (4.17); наближення  $\lambda = \frac{64}{Re}$  застосовують до круглого перерізу.

$$Re = \frac{v \cdot D_r}{\nu} \quad (4.16)$$

$$\lambda = \frac{96}{Re(1 + \alpha)^2(1 - 0,630\alpha)} \quad (4.17)$$

Аналітична оцінка охоплює весь фітинг завдовжки  $L_\Phi = 60$  мм: прямокутну ділянку контролю  $L = 10$  мм і решту тракту, наближено замінену круглими патрубками діаметром  $D_\Pi = 8$  мм та сумарною довжиною  $L_\Pi = L_\Phi - L = 50$  мм. Таке подання патрубків є спрощенням перехідних ділянок. Втрати на переходах враховано окремо через раніше прийняту суму  $\sum \zeta_i = 1,5$ , віднесену до швидкості  $v = \frac{Q}{bd}$ . Загальний перепад тиску обчислено як суму трьох складових за (4.18).

$$\Delta p_d = \frac{12\mu L Q}{bd^3(1 - 0,630\alpha)} + \frac{128\mu L_\Pi Q}{\pi D_\Pi^4} + \sum \zeta_i \frac{\rho v^2}{2} \quad (4.18)$$

У (4.18) перший доданок описує тертя в прямокутному каналі, другий – у наближено заданих круглих патрубках, третій – місцеві втрати;  $Q$  підставляють у м<sup>3</sup>/с, геометричні розміри – у метрах. Коефіцієнт  $(1 - 0,630\alpha)$  враховує скінченну ширину прямокутного перерізу. Параметри моделі не визначали підбором до значень FEM.

Результати аналітичного розрахунку гідравлічних параметрів у діапазоні витрат 1–10 л/год наведено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

**Уточнена аналітична оцінка гідравлічних параметрів фітингу в діапазоні витрат 1–10 л/год ( $p_{\text{ном}} = 0,14$  МПа)**

| $Q$ ,<br>л/год | $v$ , м/с | $Re$ | $\lambda$ | $\Delta p_d$ , Па | Частка від<br>0,14 МПа,<br>% | $t_z$ , с |
|----------------|-----------|------|-----------|-------------------|------------------------------|-----------|
| 1              | 0,0093    | 10   | 7,024     | 1,10              | 0,00079                      | 1,080     |
| 2              | 0,0185    | 20   | 3,512     | 2,31              | 0,00165                      | 0,540     |
| 3              | 0,0278    | 30   | 2,341     | 3,62              | 0,00259                      | 0,360     |
| 4              | 0,0370    | 40   | 1,756     | 5,05              | 0,00360                      | 0,270     |
| 5              | 0,0463    | 50   | 1,405     | 6,58              | 0,00470                      | 0,216     |
| 6              | 0,0556    | 60   | 1,171     | 8,22              | 0,00587                      | 0,180     |
| 7              | 0,0648    | 70   | 1,003     | 9,96              | 0,00712                      | 0,154     |
| 8              | 0,0741    | 80   | 0,878     | 11,82             | 0,00844                      | 0,135     |
| 9              | 0,0833    | 90   | 0,780     | 13,78             | 0,00985                      | 0,120     |
| 10             | 0,0926    | 100  | 0,702     | 15,86             | 0,01133                      | 0,108     |

За таблицею 4.12 уточнена аналітична втрата тиску на ДДП зростає від 1,10 до 15,86 Па, що становить 0,00079–0,01133 % прийнятого номінального тиску 0,14 МПа. За витрати 5 л/год внески прямокутного каналу, патрубків і місцевих опорів дорівнюють відповідно 2,74; 2,49 і 1,35 Па, разом 6,58 Па.

Тривалість оновлення палива саме в ділянці ДДП визначено за (2.20) для  $V_k = 0,30$  мл. Вона зменшується від 1,08 с при 1 л/год до 0,108 с при 10 л/год; при 5,2 л/год становить близько 0,208 с. Цей час характеризує заміщення об'єму між електродами й не дорівнює повному часу реакції системи, який також залежить від зчитування та оброблення сигналу.

Для варіантів ДДП площею 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup> за сталої ширини каналу 10 мм довжина міжелектродної ділянки становить 5, 10 і 15 мм. За однакової витрати та відстані між електродами 3 мм перший доданок формули (4.18), який описує тертя в цій ділянці, пропорційний її довжині. Тому перехід від 1,0

до  $1,5 \text{ см}^2$  збільшує зазначену складову втрат на 50 %. За витрати 5,2 л/год розрахункові часи заміщення об'ємів 0,15; 0,30 та 0,45 мл становлять відповідно 0,104; 0,208 і 0,312 с.

Для зіставлення з аналітичною оцінкою використано наведені результати чисельного моделювання течії в Elmer FEM із візуалізацією в ParaView. Модель описує повністю заповнений ДДП завдовжки 60 мм, вхідний і вихідний патрубки діаметром 8 мм та два електроди  $10 \times 10 \times 1,5 \text{ мм}$ , розташовані на відстані 3 мм один від одного. Ширина ділянки контролю дорівнює 10 мм, площа перерізу –  $30 \text{ мм}^2$ . На рисунку 4.22 задано  $\mu = 0,0036 \text{ Па}\cdot\text{с}$  і  $\rho = 840 \text{ кг/м}^3$ ; ці самі значення використано в уточненому аналітичному розрахунку. Вихідні значення перепаду тиску FEM збережено.

Порівняння виконано для десяти наявних режимів  $Q = 1\text{--}10 \text{ л/год}$  із кроком 1 л/год. В обох оцінках розглянуто перепад тиску між входом і виходом усього фітінгу. Поля швидкості й тиску для  $Q = 5 \text{ л/год}$  наведено на рисунку 4.22.

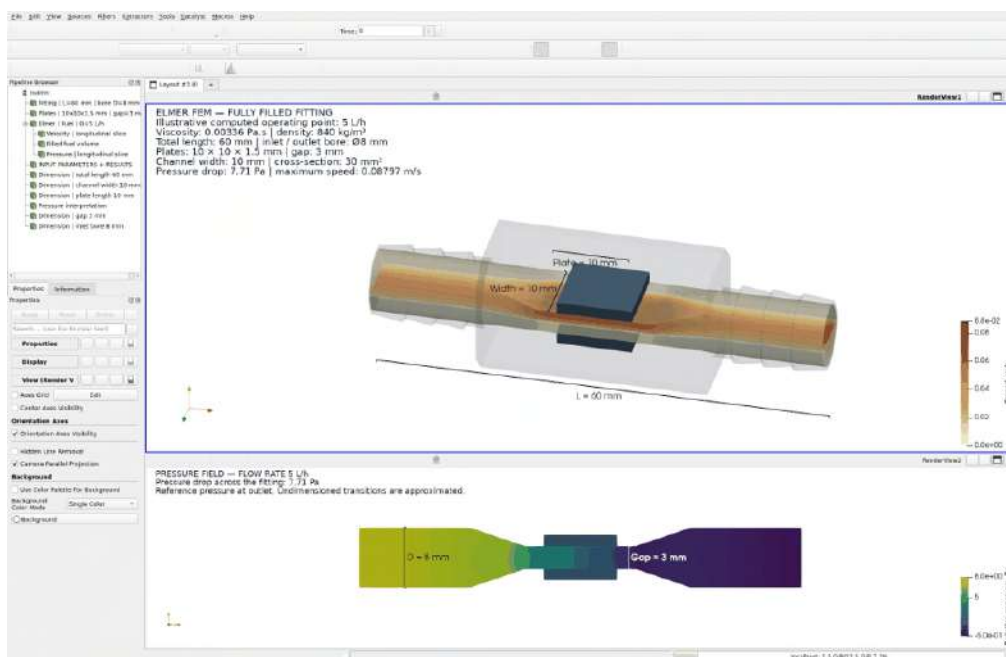


Рисунок 4.22 – Чисельне моделювання (Elmer FEM) поля швидкості та тиску у проточній частині датчика за витрати 5 л/год

Для  $Q = 5 \text{ л/год}$  на рисунку 4.22 наведено максимальну швидкість 0,088 м/с і перепад тиску 7,71 Па. Середня швидкість за балансом витрати становить

$$\frac{Q}{S_k}$$

$S_k = 0,0463 \text{ м/с}$ ; її слід відрізняти від локального максимуму поля швидкості.

Уточнена аналітична оцінка перепаду дорівнює 6,58 Па. Різниця 1,13 Па, або 14,7 % від значення FEM, характеризує залишкове розходження моделей за однакових властивостей палива. Порівняння перепадів тиску, отриманих аналітично та за результатами Elmer FEM у діапазоні витрат 1–10 л/год, наведено в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

**Порівняння уточненого аналітичного розрахунку всього фітінгу з наведеними результатами Elmer FEM ( $p_{\text{ном}} = 0,14 \text{ МПа}$ )**

| $Q$ ,<br>л/год | $\Delta p_{\text{д,ан}}$ , Па | $\Delta p_{\text{д,FEM}}$ , Па | $k = \frac{\Delta p_{\text{д,FEM}}}{\Delta p_{\text{д,ан}}}$ | $Re$<br>(обидва) | Частка від<br>0,14 МПа<br>(FEM), % |
|----------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------|
| 1              | 1,10                          | 1,41                           | 1,28                                                         | 10               | 0,00101                            |
| 2              | 2,31                          | 2,87                           | 1,24                                                         | 20               | 0,00205                            |
| 3              | 3,62                          | 4,40                           | 1,21                                                         | 30               | 0,00314                            |
| 4              | 5,05                          | 6,01                           | 1,19                                                         | 40               | 0,00429                            |
| 5              | 6,58                          | 7,71                           | 1,17                                                         | 50               | 0,00551                            |
| 6              | 8,22                          | 9,49                           | 1,15                                                         | 60               | 0,00678                            |
| 7              | 9,96                          | 11,34                          | 1,14                                                         | 70               | 0,00810                            |
| 8              | 11,82                         | 13,28                          | 1,12                                                         | 80               | 0,00949                            |
| 9              | 13,78                         | 15,29                          | 1,11                                                         | 90               | 0,01092                            |
| 10             | 15,86                         | 17,38                          | 1,10                                                         | 100              | 0,01241                            |

Після уточнення аналітичної моделі співвідношення  $k = \frac{\Delta p_{\text{д,FEM}}}{\Delta p_{\text{д,ан}}}$  зменшується від 1,28 при 1 л/год до 1,10 при 10 л/год. Відносне розходження  $\delta = \frac{|\Delta p_{\text{д,FEM}} - \Delta p_{\text{д,ан}}|}{\Delta p_{\text{д,FEM}}} \cdot 100 \%$  становить відповідно 22,0 і 8,8 %. Залишкова різниця може бути пов'язана зі спрощеним описом переходів, прийнятим  $\Sigma \zeta_i$  та формуванням профілю швидкості в короткому каналі. Окремий внесок цих чинників без аналізу граничних умов і збіжності сітки не визначено; наведене порівняння не є оцінкою похибки FEM.

За результатами FEM перепад тиску становить 1,41–17,38 Па, або 0,00101–0,01241 % прийнятого номінального тиску 0,14 МПа. Це характеризує малий додатковий опір за розглянутих витрат. Остаточна перевірка нерівності (2.19) потребує окремо заданого допустимого перепаду  $\Delta p_{\text{доп}}$ ; номінальний тиск сам по собі не є цим критерієм.

У разі збільшення витрати від 1 до 10 л/год розрахований у FEM перепад тиску зростає від 1,41 до 17,38 Па, тобто приблизно у 12,3 раза. Зростання витрат дещо випереджає збільшення витрати, що узгоджується з урахуванням у розрахунковій схемі як тертя в каналі, так і місцевих опорів. Тому характеристику датчика оцінюють у всьому заданому діапазоні витрат, а не лише в одній робочій точці.

Порівняння результатів аналітичного розрахунку та чисельного моделювання наведено на рисунку 4.23.

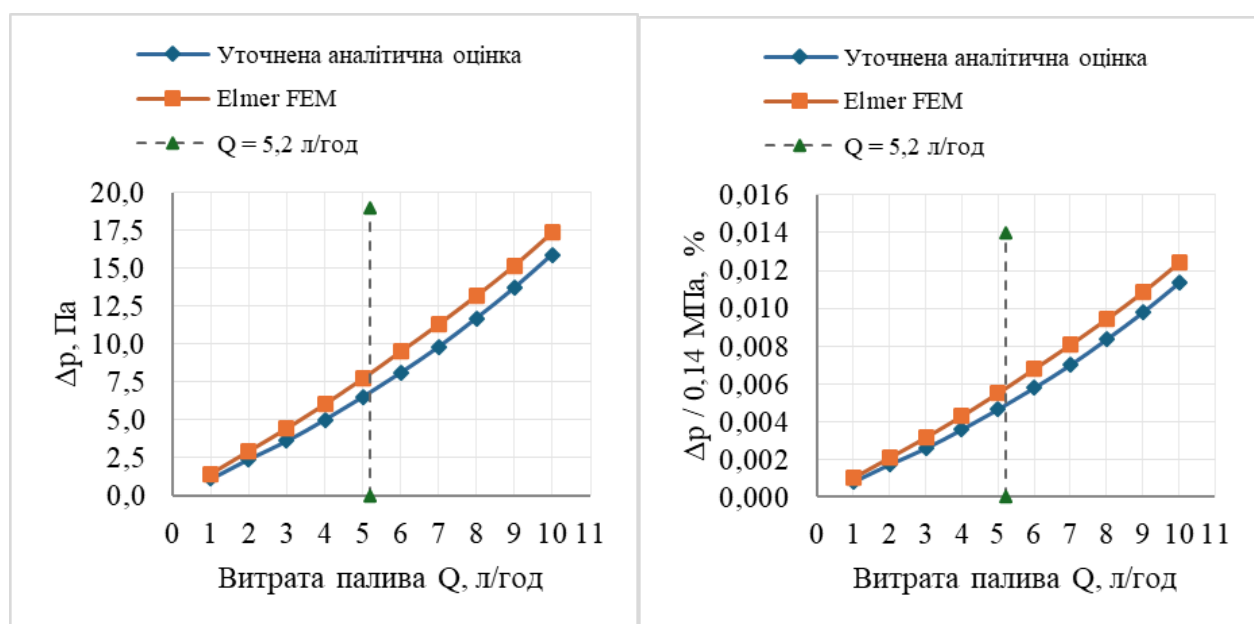


Рисунок 4.23 – Порівняння уточненої аналітичної оцінки та результатів Elmer FEM: перепад тиску (ліворуч), його частка від 0,14 МПа (праворуч)

Для розрахункового орієнтира споживання 5,2 л/год аналітична оцінка становить 6,90 Па. Лінійна інтерполяція між наявними значеннями FEM для 5 і 6 л/год дає 8,07 Па, тобто розходження близько 14,5 % від FEM. Значення 8,07 Па є інтерполяційною оцінкою, а не результатом окремого чисельного

розрахунку. На рисунку 4.23 витрату 5,2 л/год позначено вертикальною штриховою лінією.

Таким чином, за прийнятих вихідних параметрів розрахункове споживання палива трактором «Булат 244» за повного навантаження становить близько 5,2 л/год. Верхня межа розглянутого діапазону витрат 1–10 л/год перевищує це значення приблизно в 1,9 раза. За наведеними результатами чисельного моделювання найбільша втрата тиску на датчику при  $Q = 10$  л/год становить 17,38 Па, або 0,0124 % прийнятого номінального тиску 0,14 МПа.

Загальний вигляд мінітрактора та встановленої СМЯСП наведено на рисунку 4.24 .



Рисунок 4.24 – Установлення СМЯСП у паливній системі мінітрактора «Булат 244»: а – загальний вигляд і розміщення обладнання; б – загальний вигляд підключеної СМЯСП.

На рисунку 4.24, а наведено загальний вигляд трактора «Булат 244» і розміщення обладнання в його системі живлення під час експлуатаційної перевірки. На рисунку 4.24, б детальніше показано підключену СМЯСП та її приєднання до паливопроводів, що дає змогу простежити розташування ділянки контролю відносно суміжних елементів. Електронний блок із показами дисплея та підключеним ДДП представлено на рисунку 4.25. Наведений вигляд ілюструє з'єднання основних складових системи та відображення вихідного сигналу, за яким контролюють зміну стану сумішевого палива.



Рисунок 4.25 – СМЯСП на тракторі «Булат 244» з відображенням вихідного сигналу та стану індикації

На рисунку 4.25 наведено приклад роботи дисплея під час установлення СМЯСП на тракторі. Позначення «Raw: 2» відображає первинне значення сигналу до нормування. Повідомлення «CLEAN FUEL» відповідає стану демонстраційної індикації за встановленими програмними порогоми.

#### **4.6 Планові витрати на виготовлення та встановлення СМЯСП**

Розрахунок охоплює планові витрати на виготовлення датчика, його комплектацію електронним блоком (ЕБ) та встановлення СМЯСП у паливній

системі мінітрактора. Витрати визначено на один виріб. Лабораторні насос, бак і витратомір до складу комплексу не включено. Вартість матеріалів, комплектувальних виробів і робіт, трудомісткість складання, витрати на оснащення та підготовку виготовлення, а також частку накладних витрат прийнято для планового розрахунку. Ці значення не є підтвердженими фактичними витратами та потребують уточнення під час виготовлення й установлення системи.

Структуру прийнятих матеріальних витрат наведено на рисунку 4.26.

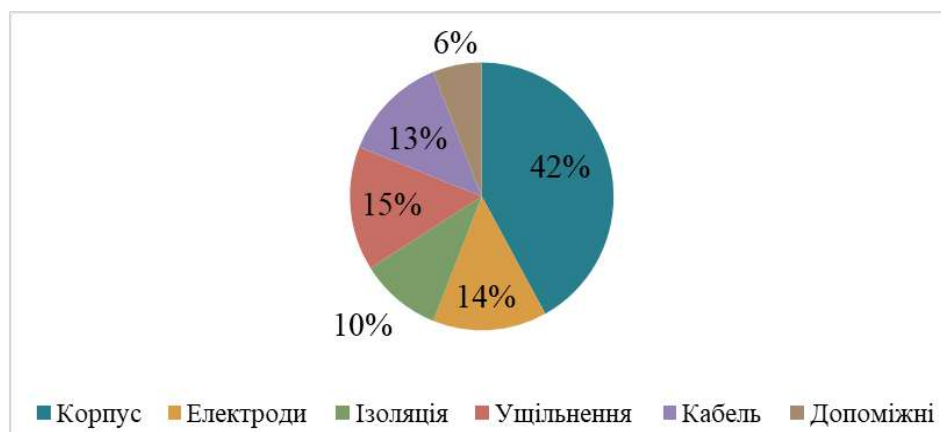


Рисунок 4.26 – Структура планових матеріальних витрат на виготовлення датчика

Найбільшу частку планових матеріальних витрат становлять корпус, його виготовлення та кріплення – 180 грн, або близько 42 % загальної суми. Решта витрат припадає на електроди, ізоляційні деталі, ущільнення, з'єднання та допоміжні матеріали. Загальна сума становить 430 грн; її розподіл за складовими наведено в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14

#### Прийняті планові матеріальні витрати на один датчик

| Складова витрат                   | Витрати, грн |
|-----------------------------------|--------------|
| Корпус, виготовлення та кріплення | 180          |
| Пара вимірювальних електродів     | 60           |
| Ізоляційні й дистанційні деталі   | 45           |
| Ущільнення та герметизація        | 65           |

| Складова витрат     | Витрати, грн |
|---------------------|--------------|
| Кабель і з'єднання  | 55           |
| Допоміжні матеріали | 25           |
| Разом               | 430          |

Планову трудомісткість складання та контролю датчика прийнято в розмірі 1,6 люд.-год, погодинну ставку – 200 грн/год. Відповідні витрати становлять 320 грн на виріб. Вартість виготовлення корпусу враховано в матеріальних витратах; повторно до витрат на складання її не включають. Витрати на використання оснащення прийнято в розмірі 50 грн на виріб, накладні витрати – 15 % суми прямих витрат. Планові змінні витрати на один виріб визначають за формулою (4.19).

$$З_{зм} = (З_{мат} + З_{роб} + З_{осн})(1 + k_n), \quad (4.19)$$

де  $З_{зм}$  – змінні витрати на один виріб, грн;  $З_{мат}$  – матеріали та комплектувальні вироби, грн;  $З_{роб}$  – вартість складання й контролю, грн;  $З_{осн}$  – витрати на використання оснащення, грн;  $k_n$  – коефіцієнт накладних витрат, прийнятий рівним 0,15.

Для датчика  $З_{зм} = (430 + 320 + 50) \cdot 1,15 = 920$  грн. Порівняння двох варіантів комплектації наведено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15

#### Планові змінні витрати для двох варіантів комплектації

| Стаття витрат                | ДДП, грн | СМЯСП (ДДП + ЕБ), грн |
|------------------------------|----------|-----------------------|
| Матеріали та комплектувальні | 430,00   | 1080,00               |
| Складання та контроль        | 320,00   | 520,00                |
| Використання оснащення       | 50,00    | 50,00                 |
| Прямі витрати                | 800,00   | 1650,00               |
| Накладні витрати, 15 %       | 120,00   | 247,50                |
| Разом $З_{зм}$               | 920,00   | 1897,50               |

СМЯСП складається з ДДП та ЕБ. До складу ЕБ входять плата Arduino, елементи вимірювального кола, дисплей LCD 16×2 з інтерфейсом I<sup>2</sup>C та світлодіодні індикатори, розміщені в окремому корпусі. У планових витратах на комплект враховано також приладдя для зовнішнього живлення системи. Порівняно з виготовленням окремого ДДП додатково прийнято 650 грн матеріальних витрат і 200 грн витрат на складання та контроль. З урахуванням накладних витрат планові витрати на комплект СМЯСП перевищують витрати на ДДП на 977,50 грн.

Одноразові підготовчі витрати прийнято 800 грн для датчика та 1200 грн для комплекту. Планові витрати на один придатний виріб партії визначають за формулою (4.20).

$$Z_{\text{од}}(N) = Z_{\text{зм}} + \frac{Z_{\text{підг}}}{N}, \quad (4.20)$$

де  $Z_{\text{од}}(N)$  – витрати на одиницю продукції в партії, грн/шт.;  $Z_{\text{підг}}$  – одноразові витрати на підготовку виготовлення партії, грн;  $N$  – кількість придатних виробів у партії, шт. Розрахунок передбачає незмінні питомі змінні витрати та розподіл підготовчих витрат між придатними виробами. Результати розрахунку планових витрат на одиницю продукції залежно від розміру партії наведено в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16

**Планові витрати на одиницю залежно від розміру партії**

| Кількість $N$ , шт. | ДДП, грн/шт. | СМЯСП (ДДП + ЕБ),<br>грн/шт. |
|---------------------|--------------|------------------------------|
| 1                   | 1720,00      | 3097,50                      |
| 10                  | 1000,00      | 2017,50                      |
| 50                  | 936,00       | 1921,50                      |
| 100                 | 928,00       | 1909,50                      |

Залежність планових витрат від розміру партії наведено на рисунку 4.27. Для 10 виробів витрати становлять 1000 грн/шт. для датчика та 2017,50 грн/шт. для комплексу. Зниження порівняно з одиничним виготовленням зумовлене розподілом одноразових підготовчих витрат.

Для партії з 10 виробів підготовчі витрати на один датчик становлять 80 грн, а на комплект з ЕБ – 120 грн. За прийнятої схеми розрахунку збільшення партії зменшує підготовчі витрати на одиницю продукції, тоді як питомі витрати на матеріали, складання та використання оснащення залишаються незмінними.

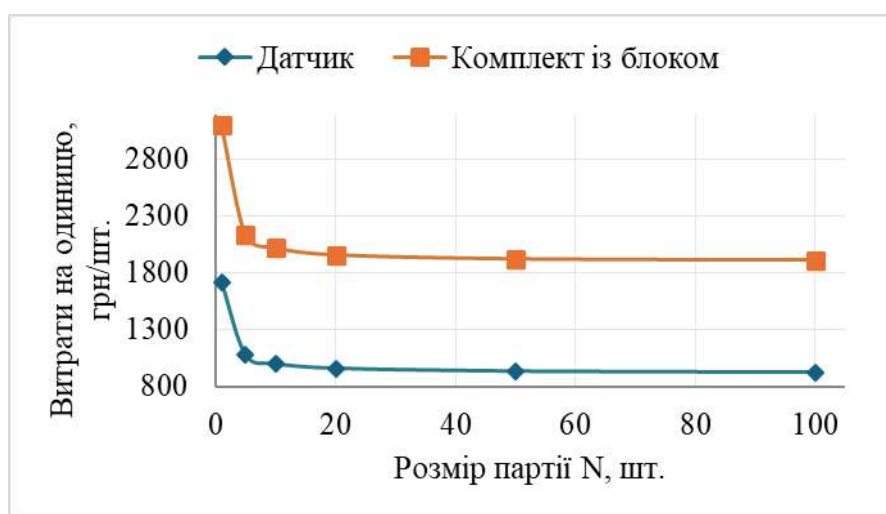


Рисунок 4.27 – Планові витрати на одиницю продукції залежно від розміру партії

Установлення СМЯСП передбачає підключення ДДП до паливопроводу між фільтром і ПНВТ, ущільнення з'єднань, прокладання сигнального кабелю, закріплення ЕБ та перевірку герметичності. У разі живлення від бортової мережі необхідно забезпечити стабілізовану напругу 5 В для електронного блока.

Додаткові планові витрати на встановлення одного комплексу СМЯСП прийнято в межах 150–300 грн. До них віднесено монтажні роботи та додаткові кріплення, кабель і роз'єми, які не враховано у вартості комплексу. Для комплексу з партії 10 виробів вартістю 2017,50 грн загальні планові витрати на

виготовлення та встановлення становлять 2167,50–2317,50 грн на один мінітрактор.

Отже, планові змінні витрати становлять 920 грн для датчика та 1897,50 грн для комплекту з ЕБ. Для партії з 10 виробів з урахуванням підготовчих витрат отримано відповідно 1000 і 2017,50 грн на виріб. Зниження витрат можливе завдяки уніфікації деталей та зменшенню трудомісткості складання. Річну економію від використання СМЯСП під час досліджень не визначали, тому строк окупності не розраховували.

#### 4.7 Висновки до розділу 4

За відновленим набором 27 значень встановлено спільний вплив частки біопалива, температури та площі електродів на вихідний сигнал СМЯСП. У діапазонах  $B = 0\text{--}100\%$ ,  $T = 10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$  та  $A = 0,5\text{--}1,5\text{ см}^2$  сигнал становить 31,18–68,81 ум. од. За площі  $1,0\text{ см}^2$  підвищення температури від 10 до  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  зменшує сигнал  $B_{100}$  на 18,30 ум. од., а  $B_0$  – на 0,68 ум. од. Це характеризує залежність температурного впливу від складу палива. Для квадратичної моделі зі збереженими коефіцієнтами отримано  $R^2 = 0,8489$ ,  $\text{RMSE} = 3,91$  ум. од. та максимальне абсолютне відхилення 8,20 ум. од.

За таблицею 4.1 при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $A = 1,0\text{ см}^2$  та  $d = 3\text{ мм}$  середня чутливість на інтервалах  $B = 0\text{--}50\%$  та  $50\text{--}100\%$  становить 0,1981 та 0,0465 ум. од./% відповідно; у другому інтервалі вона приблизно у 4,26 рази менша. На інтервалі  $0\text{--}100\%$  отримано 0,1223 ум. од./%. За окремими повторними серіями таблиці 4.7  $K_{\text{інф}} = 4,81$ , усі попарні 95 % довірчі інтервали різниць середніх не містять нуля, а максимальний CV становить 0,93 %. Для окремої часової серії  $B_{50}$  максимальне відхилення від початкового показу за 10 хв дорівнює 2,36 %. За моделлю зі збереженими коефіцієнтами межа зростаючої гілки  $B^* \approx 91,78\%$ , тому однозначне обернене визначення складу в усьому діапазоні  $0\text{--}100\%$  не забезпечується.

Для дослідного зразка прийнято площу електродів  $1,0\text{ см}^2$ , розміри  $10 \times 10\text{ мм}$ , відстань між електродами 3 мм та об'єм ділянки контролю 0,30 мл. За

температури 20 °С збільшення площі до 1,5 см<sup>2</sup> підвищує різницю середніх сигналів В100 і В0 від 12,23 до 24,31 ум. од., проте водночас збільшує довжину й об'єм ділянки контролю на 50 %. За витрати 5,2 л/год розрахункова тривалість заміщення палива між електродами зростає від 0,208 до 0,312 с. Варіант із площею 1,0 см<sup>2</sup> прийнято як конструктивний компроміс між розрізненням сигналів досліджених складів за опорних умов та розмірами ділянки контролю.

За результатами гідравлічного розрахунку обраної конструкції в діапазоні витрат 1–10 л/год отримано числа Рейнольдса близько 10–100, що відповідає ламінарному режиму руху палива. Перепад тиску за результатами Elmer FEM становить 1,41–17,38 Па. За витрати 5,2 л/год, прийнятої як розрахунковий орієнтир споживання двигуном трактора «Булат 244» за повного навантаження, аналітична оцінка перепаду дорівнює 6,90 Па, а інтерполяційна оцінка за результатами FEM – 8,07 Па. Розходження становить близько 14,5 % відносно оцінки FEM. Отримані значення характеризують малий додатковий гідравлічний опір у розглянутих умовах; остаточна перевірка гідравлічної придатності потребує зіставлення з допустимим перепадом тиску за фактичної витрати через датчик. Практичне встановлення СМЯСП на тракторі «Булат 244» із двигуном КМ385ВТ підтвердило можливість її розміщення та підключення між паливним фільтром і ПНВТ. Під час перевірки контролювали герметичність з'єднань, стабільність живлення, наявність потоку палива та зчитування сигналу.

Виконано планове оцінювання витрат на виготовлення датчика, комплекту СМЯСП з ЕБ та його встановлення. Планові змінні витрати на один датчик становлять 920 грн, на комплект – 1897,50 грн. З урахуванням одноразових підготовчих витрат за одиничного виготовлення відповідні значення становлять 1720 і 3097,50 грн, а для партії з 10 виробів – 1000 і 2017,50 грн на одиницю. Загальні планові витрати на виготовлення та встановлення комплекту з цієї партії становлять 2167,50–2317,50 грн на один двигун внутрішнього згорання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне та експериментальне обґрунтування параметрів СМЯСП для дизельних двигунів. Розроблено її конструкцію та математичний опис формування вихідного сигналу, створено лабораторний стенд для дослідження впливу компонентного складу палива, температури й площі електродів на результати вимірювань. Оцінено гідравлічні характеристики датчика та умови його інтеграції в паливну магістраль дизельного двигуна, визначено планові витрати на виготовлення й установаження розробленої системи.

1. Проаналізовано властивості сумішей ДП нафтового походження та біопалива, чинники погіршення їхньої якості й методи контролю. За розрахунковими даними для розглянутих зразків збільшення частки біопалива від 0 до 100 % супроводжується підвищенням густини від 855,1 до 876,5 кг/м<sup>3</sup> і кінематичної в'язкості від 3,00 до 4,20 мм<sup>2</sup>/с та зменшенням теплоти згоряння від 45,87 до 40,17 МДж/кг. Основними чинниками погіршення якості визначено надходження води, механічних домішок і сторонніх нафтопродуктів, накопичення продуктів корозії та окиснення, мікробіологічне забруднення. Узагальнено їхній вплив на паливоподачу, розпилювання, зношування й утворення відкладень у паливній апаратурі. На основі порівняння лабораторних, портативних і вбудованих методів обґрунтовано вимоги до СМЯСП: інформативність, стабільність, однозначність і чутливість сигналу з урахуванням складу та температури палива.

2. Розроблено математичну модель формування вихідного сигналу СМЯСП з урахуванням компонентного складу палива, температури, домішок, геометрії ДДП та параметрів вимірювального кола. За відносної діелектричної проникності палива 2,20 і відстані між електродами 3 мм розрахункова ємність ДДП з площами електродів 0,5; 1,0 і 1,5 см<sup>2</sup> становить відповідно 0,325; 0,649 і 0,974 пФ. У програмному середовищі COMSOL Multiphysics змодельовано розподіл електричного поля між електродами ДДП. За різниці потенціалів 1 В

середній модуль напруженості поля для зазначених площ становить відповідно 311,2; 318,7 і 321,2 В/м, а коефіцієнт його просторової варіації – 6,94; 6,08 і 5,59 %, що характеризує підвищення однорідності поля зі збільшенням площі електродів. Температурну залежність описано в діапазоні 10–30 °С з опорним значенням 20 °С. Установлено, що один сигнал не забезпечує одночасного роздільного визначення вмісту води, сірковмісних сполук і механічних домішок; оцінювання окремої домішки потребує спеціального градування.

3. Створено лабораторний стенд із замкненим контуром циркуляції та методику дослідження впливу частки біопалива, температури й площі електродів на вихідний сигнал СМЯСП. Для рівнів  $B = 0; 50; 100 \%$ ,  $T = 10; 20; 30 \text{ } ^\circ\text{C}$  та  $A = 0,5; 1,0; 1,5 \text{ см}^2$  відновлений набір охоплює 27 значень сигналу в межах 31,18–68,81 ум. од. За площі  $1,0 \text{ см}^2$  підвищення температури від 10 до 30 °С зменшує сигнал  $B_{100}$  від 63,28 до 44,98 ум. од., а різницю сигналів  $B_{100}$  і  $B_0$  – від 25,45 до 7,83 ум. од. Для  $B_{100}$  збільшення площі від 0,5 до 1,5  $\text{см}^2$  підвищує сигнал на 22,55 ум. од. за 10 °С та на 19,03 ум. од. за 30 °С. При  $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $A = 1,0 \text{ см}^2$  та  $d = 3 \text{ мм}$  середні чутливості на інтервалах 0–50 % та 50–100 % дорівнюють 0,1981 та 0,0465 ум. од./%; у другому інтервалі чутливість у 4,26 раза менша. На інтервалі 0–100 % вона становить 0,1223 ум. од./%. За окремими повторними серіями  $K_{\text{інф}} = 4,81$  та максимальний  $CV = 0,93 \%$ , за часовою серією  $B_{50}$  максимальне відхилення за 10 хв становить 2,36 %. Межа зростаючої гілки моделі зі збереженими коефіцієнтами  $B^* \approx 91,78 \%$ , що обмежує однозначне обернене визначення складу. Для квадратичної моделі зі збереженими коефіцієнтами отримано  $R^2 = 0,8489$ ,  $RMSE = 3,91$  ум. од. та максимальне абсолютне відхилення 8,20 ум. од.

4. Обґрунтовано конструктивний варіант ДДП із плоскопаралельними електродами площею  $1,0 \text{ см}^2$  та відстанню між ними 3 мм. Вибір забезпечує компроміс між розрізненням сигналів досліджених складів палива, габаритами й гідравлічним опором. Для ЕБ на платформі Arduino прийнято резистор 1 МОм, живлення 5 В, 30 внутрішніх зчитувань бібліотеки CapacitiveSensor на програмний відлік та усереднення п'яти відліків. Реалізовано нормування до

шкали 1–100 ум. од. за опорними значеннями 31,18 і 68,81 ум. од., відображення первинного сигналу на LCD-дисплеї та світлову індикацію нормального стану, попередження й тривоги. За результатами моделювання в Elmer FEM у діапазоні витрат 1–10 л/год перепад тиску становить 1,41–17,38 Па за ламінарної течії. За розрахункової витрати 5,2 л/год аналітична та інтерполяційна FEM-оцінки дорівнюють відповідно 6,90 і 8,07 Па, розходження – 14,5 % відносно FEM. Установлення на тракторі «Булат 244» із двигуном KM385BT між паливним фільтром і ПНВТ підтвердило монтажну придатність СМЯСП, можливість герметичного підключення та зчитування сигналу.

5. Визначено планові витрати на виготовлення СМЯСП та її встановлення в систему живлення дизельного двигуна. Змінні витрати становлять 920 грн для ДДП та 1897,50 грн для комплекту з ЕБ. Для партії з 10 виробів із розподілом одноразових підготовчих витрат отримано відповідно 1000 і 2017,50 грн на одиницю. За прийнятих додаткових витрат на встановлення 150–300 грн загальні планові витрати для комплекту з цієї партії становлять 2167,50–2317,50 грн на один дизельний двигун.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. REN21. Renewables 2025 Global Status Report. Global Overview: data pack. 2025. URL: [https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/datapacks/go/GSR\\_2025\\_GO\\_datapack.xlsx](https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/datapacks/go/GSR_2025_GO_datapack.xlsx). (дата звернення: 06.09.2026).
2. World Bioenergy Association. Global Bioenergy Statistics 2025 URL: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/251118%20GBSR.pdf>. (дата звернення: 06.09.2026).
3. Mohiddin M. N. B., Tan Y. H., Seow Y. X. et al. Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 98. P. 60–81. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.03.036. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.036>.
4. Грабар І. Г., Колодницька Р. В., Семенов В. Г. Біопалива на основі олій для дизельних двигунів: монографія. Житомир : ЖДТУ, 2011. 152 с.
5. USDA Foreign Agricultural Service. Biofuels Annual. European Union. Report No. E42025-0004. 12 August 2025. 42 p. Table 11, p. 25–26. URL: [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels+Annual\\_The+Hague\\_European+Union\\_E42025-0004.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels+Annual_The+Hague_European+Union_E42025-0004.pdf). (дата звернення: 09.09.2026).
6. Калетнік Г. М. Диверсифікація розвитку виробництва біопалив – основа забезпечення продовольчої, енергетичної, економічної та екологічної безпеки України. *Вісник аграрної науки*. 2018. Т. 96, № 11. С. 169–176. DOI: 10.31073/agrovisnyk201811-21. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201811-21>.
7. Мазур К. В., Гонтарук Я. В. Перспективи розвитку виробництва біодизелю як напрям забезпечення енергетичної безпеки держави. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*. 2023. № 15. С. 84–90. DOI: 10.32782/2708-0366/2023.15.10. URL: <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.15.10>.

8. Калетнік Г. М., Климчук О. В. Екологічна енергетика – основа розвитку економіки держави. *Збалансоване природокористування*. 2013. № 2–3. С. 14–17. URL: <https://repository.vsau.org/card.php?id=16635&lang=uk>.

9. Kaletnik G., Honcharuk I., Okhota Y. The Waste-Free Production Development for the Energy Autonomy Formation of Ukrainian Agricultural Enterprises. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2020. Vol. 11, No. 3(43). P. 513–522. DOI: 10.14505//jemt.v11.3(43).02. URL: [https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3\(43\).02](https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3(43).02).

10. Калетнік Г. М., Шаргородський С. А., Браніцький Ю. Ю. Розробка кінематичної схеми причіпного комбайна для збирання енергетичної верби. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3 (102). С. 11–21. URL: <https://tetapk.vsau.org/storage/articles/February2020/0WJgRwOqFrH5JgOtQj77.pdf>.

11. Рябошапка В. Б. Comprehensive study of the feasibility criteria for biodiesel production based on farming enterprises. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 4 (127). С. 57–69. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-4-6. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-4-6>.

12. Kupchuk I., Yemchyk T., Gontaruk Y. Prospects for the development of biodiesel production in Ukraine with consideration of socio-economic and environmental efficiency. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2024. Vol. 10, No. 5. P. 228–233. DOI: 10.30525/2256-0742/2024-10-5-228-233. URL: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-5-228-233>.

13. Zamula I., Ilchenko A., Travin V. Financial Forecast of Biofuel Production and Use in Ukraine During and After Military Actions. *Science and Innovation*. 2025. Vol. 21, No. 6. P. 77–86. DOI: 10.15407/scine21.06.077. URL: <https://doi.org/10.15407/scine21.06.077>.

14. Гунько І. В., Бурлака С. А., Єленич А. П. Оцінка екологічності нафтового палива та біопалива з використанням методології повного життєвого циклу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. Т. 2. № 6 (267). С. 246–249. URL: <https://repository.vsau.org/card.php?id=19276&lang=uk>.

15. Парсаданов І. В., Рикова І. В., Лал А. Г., Шелестов М. С. Визначення екологічних показників дизельного двигуна в умовах виробництва. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2025. № 1. С. 29–37. DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.04. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.1.04>.

16. Парсаданов І. В., Рикова І. В. Урахування шкідливої дії діоксиду вуглецю при комплексній оцінці витрати палива і токсичності відпрацьованих газів дизельних двигунів. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2022. № 1. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.1.05. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.05>.

17. Калетнік Г. М. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України: навч. посібник. Київ : Аграрна наука, 2010. 327 с.

18. Бендера І. М., Дуганець В. І., Кизима М. І., Ковалишин С. Й., Кувачов В. П. Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали: навч.-метод. комплекс. Кам'янець-Подільський: Сисин Я. І.: Абетка, 2016. 419 с.

19. Alleman T. L., McCormick R. L., Christensen E. D., Fioroni G., Moriarty K., Yanowitz J. Biodiesel Handling and Use Guide. 5th ed. National Renewable Energy Laboratory, 2016. DOE/GO-102016-4875. DOI: 10.2172/1332064. URL: <https://doi.org/10.2172/1332064>. (дата звернення: 20.09.2026).

20. Burlaka S., Boretska T., Kupchuk I. Directions and methods of modernization of the energy sector through the use of biofuels. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 55. P. 44–51. DOI: 10.15544/ageng.2023.55.5. URL: <https://doi.org/10.15544/ageng.2023.55.5>.

21. Анісімов В. Ф., Гунько І. В., Рябошапка В. Б. Development of a method for determination of fatty-acid composition and lower heat of combustion of biodiesel fuel. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4 (119). С. 5–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-4-1. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-4-1>.

22. Burlaka S., Yemchyk T., Yelenych A., Okhota Y. Use of vegetable oils as environmental additives in diesel fuel. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 54. P. 39–48. DOI: 10.15544/ageng.2022.54.5. URL: <https://doi.org/10.15544/ageng.2022.54.5>.

23. Hsieh P. Y., Bruno T. J. A perspective on the origin of lubricity in petroleum distillate motor fuels. *Fuel Processing Technology*. 2015. Vol. 129. P. 52–60. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.08.012. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.012>.

24. Анісімов В. Ф., Рябошапка В. Б., Єленич А. П. Модернізація конструкції системи сумішоутворення і паливоподачі тракторних дизелів для роботи на біопаливі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 4 (111). С. 135–147. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-16. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-4-16>.

25. Burlaka S., Kupchuk I., Tverdokhlib I. Development of the methodology and substantiation of fuel supply parameters in the transition to biofuel. *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 54. P. 8–19. DOI: 10.15544/ageng.2022.54.2. URL: <https://doi.org/10.15544/ageng.2022.54.2>.

26. Бурлака С. А., Галушак О. О., Гуменюк Ю. В. Дослідження течії палива в розпилювачі форсунок при використанні спиртових добавок в емульгованих паливах. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. Т. 11, № 1. С. 18–27. DOI: 10.31649/2413-4503-2020-11-1-18-27. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-11-1-18-27>.

27. Борецька Т. О., Жарський М. М. Математичне моделювання процесу горіння три-паливної суміші в дизельному двигуні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 4 (131). С. 90–96. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-4-11. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-11>.

28. Джеджула О. М., Бурлака С. А., Жарський М. М., Дячинська О. М. Експериментальні дослідження режимів роботи дизельного двигуна за використання трьохпаливної суміші. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 3 (118). С. 81–86. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-9. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-3-9>.

29. Burlaka S., Tokarchuk O. Removal of technical and economic indicators of the D-240 engine when using biofuels by applying the Diesel-RK software complex.

*Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 24–34. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-3. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4-3>.

30. Яропуд В. М., Стаднік М. І., Бурлака С. А., Рябошапка В. Б. Дослідження методів визначення екологічних показників роботи дизельного двигуна сільськогосподарської техніки. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2026. Вип. № 2 (157). С. 272–279. DOI: 10.32782/1995-0519.2026.2.29. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2026.2.29>.

31. Анісімов В. Ф., Рябошапка В. Б., Єленич А. П. Analysis of the state and setting of the task regarding output assessment nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) with exhaust gases tractor engines. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 62–72. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-7. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-7>.

32. Ільченко А. В. Методологічні основи визначення і контролю витрат біопалив у процесі руху автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. Т. 19, № 1. С. 61–67. DOI: 10.31649/2413-4503-2024-19-1-61-67. URL: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-61-67>.

33. Бурлака С. А., Явдик В. В., Єленич А. П. Методи досліджень та способи оцінки впливу палив з відновлюваних ресурсів на роботу дизельного двигуна. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 2 (271). С. 212–220.

34. Бганцев В. М. Наукові принципи підвищення ефективних показників дизелів при використанні біопалив. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2021. № 1. С. 15–25. DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.03. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.1.03>.

35. Matijošius J., Orynycz O., Kovbasenko S. et al. Testing the Indicators of Diesel Vehicles Operating on Diesel Oil and Diesel Biofuel. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 24. Art. 9263. DOI: 10.3390/en15249263. URL: <https://doi.org/10.3390/en15249263>.

36. Ковбасенко С. В., Сімоненко В. В. Дослідження показників автобуса з дизелем за умови роботи на дизельному біопаливі. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Т. 2, № 101. С. 104–109. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.104-109. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.104-109>.

37. Kupchuk I., Burlaka S., Galushchak O., Yemchyk T., Galushchak D., Prysiazhniuk Y. Research of autonomous generator indicators with the dynamically changing component of a two-fuel mixture. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2022. Vol. 25, No. 2. P. 147–162. DOI: 10.33223/epj/150746. URL: <https://doi.org/10.33223/epj/150746>.

38. Galushchak O., Burlaka S., Kupchuk I., Bondarenko V., Gontaruk Y. Environmental indicators of the operation of a diesel generator running on a mixture of biofuels. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2023. Vol. 26, No. 4. P. 195–208. DOI: 10.33223/epj/170759. URL: <https://doi.org/10.33223/epj/170759>.

39. Цимбал С. В., Галушак О. О., Полив'янчук А. П., Галушак Д. О., Цимбал О. В. Підвищення еколого-енергетичної ефективності дизельного генератора регулюванням кута випередження впорскування палива. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 5. С. 93–98. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-170-5-93-98. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-93-98>.

40. Sokolik S. P., Kozhushko A. P., Shulyak M. L. Mathematical Modeling of Operating Conditions of a Wheeled Tractor Engine in Traction Applications. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2026. No. 2. P. 141–147. DOI: 10.32782/msnau.2026.2.20. URL: <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.2.20>.

41. Kozhushko A., Kravchenko S., Shuliak M., Kolesnik I., Danylenko V. Analysis of Fuel Economy Indicators of a Wheeled Tractor During Transportation of Partially Filled Tankers. *Combustion Engines*. 2026. Online First. Published online 22 April 2026. DOI: 10.19206/CE-220540. URL: <https://doi.org/10.19206/CE-220540>.

42. Рябошапка В. Сучасний стан і перспективи наукових досліджень переведення дизельних двигунів на біодизельне паливо. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 4 (123). С. 97–105. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-11. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-11>.

43. Рябошапка В., Івацько В. Перспективи та проблеми виробництва біодизельного палива. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128). С. 107–115. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-12. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-12>.

44. Галушак О. О. Поліпшення показників автомобіля шляхом впливу на робочі процеси дизеля при роботі на суміші палив: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.02. Вінниця, 2017. 178 с. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1758/dysertaciyanazdobuttyanaukovogostupenyakandydatatehnychnyhnauk.pdf>. (дата звернення: 10.09.2026).

45. Поляков А. П., Галушак О. О. Математична модель системи «двигун – система живлення сумішшю дизельного та біодизельного палив». *Наукові нотатки*. 2014. Вип. 45. С. 438–443. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/7681>.

46. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення : навч. посіб. / В. Я. Чабанний, М. І. Черновол, Є. К. Солових та ін. ; за ред. В. Я. Чабанного. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 486 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12123>. (дата звернення: 13.09.2026).

47. Burlaka S., Kupchuk I., Boretska T., Gontaruk Y., Melnyk M. Optimizing the process of mixing diesel fuel and biofuel in a blade mixer to improve mixture quality. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2024. Vol. 27, No. 3. P. 31–52. DOI: 10.33223/epj/189437. URL: <https://doi.org/10.33223/epj/189437>.

48. Гунько І. В. Simulation of the mixing process of diesel and biofuels. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 3 (114). С. 24–29. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-3. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-3-3>.

49. Гунько І. В., Ярошук Р. О., Бурлака С. А. Вибір оптимальної методики покращення складу сумішевого біопалива з рослинних олій. *Вісник*

Хмельницького національного університету. 2018. № 4. С. 123–127. URL: <https://socrates.vsau.org/repository/card.php?id=19214&lang=uk>.

50. Burlaka S., Kupchuk I., Shapovalyuk S., Chernysh M. Analysis of the influence of the geometry of the blade mixer on the turbulence and intensity of liquid mixing. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2023. No. 2 (121). P. 16–22. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-2. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-2>.

51. Burlaka S., Halushchak O., Borysiuk D., Baranov V. Research of the trajectory of the movement of fuel particles in the mixer. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 1 (124). P. 89–94. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-10. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-1-10>.

52. Сафтьок Я. В. Вплив шкідливих домішок в паливі на ефективність роботи двигуна внутрішнього згорання. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2026. № 4 (367). С. 111–116. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-367-16. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-16>.

53. Стаднік М. І., Яропуд В. М., Штуць А. А., Бурлака С. А., Рябошапка В. Б., Галушак О. О. Дослідження впливу домішок в паливах на техніко-економічні показники машинно-тракторних агрегатів. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2026. № 2. С. 157–164. DOI: 10.32782/msnau.2026.2.22. URL: <https://doi.org/10.32782/msnau.2026.2.22>.

54. Lacey P. I., Westbrook S. R. Diesel Fuel Lubricity. *SAE Technical Paper Series*. 1995. Vol. 1. Art. 950248. DOI: 10.4271/950248. URL: <https://doi.org/10.4271/950248>.

55. Qu J., Truhan J. J., Blau P. J. Investigation of the scuffing characteristics of candidate materials for heavy duty diesel fuel injectors. *Tribology International*. 2005. Vol. 38. No. 4. P. 381–390. DOI: 10.1016/j.triboint.2004.08.018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.018>.

56. Стаднік М. І., Яропуд В. М., Рябошапка В. Б., Бурлака С. А., Жарський Р. М. Вплив вмісту домішок у моторному паливі на термодинамічні параметри робочого циклу двигуна. *Вісник Кременчуцького національного*

університету імені Михайла Остроградського. 2026. Вип. № 3 (158). С. 105-113.

57. M&C Equipment. Stainless Steel Chemical Polyethylene Mixing Tank with Agitator for Sale. URL: <https://mcequipment.en.made-in-china.com/product/JSZQvKHMqUb/China-Stainless-Steel-Chemical-Polyethylene-Mixing-Tank-with-Agitator-for-Sale.html>. (дата звернення: 10.09.2026).

58. Xinzhonglu. Large Capacity Fuel Tank Truck. URL: <https://xinzhonglu.en.made-in-china.com/product/OGIUeEVdhJhi/China-Large-Capacity-Fuel-Tank-Truck.html>. (дата звернення: 10.09.2026).

59. Various Color 30000 Liter Portable Diesel Fuel Storage Tank. URL: <https://lq0538.en.made-in-china.com/product/UvXEVcCBpPYj/China-Various-Color-30000-Liter-Portable-Diesel-Fuel-Storage-Tank.html>. (дата звернення: 10.09.2026).

60. Ali Yaqoob Trading. Gilbarco Encore Series Fuel Dispenser. Джерело фотографії. URL: <https://aliyaqoob.com/shop/equipment/fuel-dispensers/gilbarco-dispensers/gilbarco-encore-series-fuel-dispenser>. (дата звернення: 10.09.2026).

61. AGRO.RIA. Мінітрактор «Булат 244». Оголошення № 350004086. URL: <https://agro.ria.com/sell-minitraktor-bulat-244-350004086.html>. (дата звернення: 10.09.2026).

62. Топільницький П. І., Гринишин О. Б., Романчук В. В. Якість та властивості товарних нафтопродуктів: навч. посібник. Львів: Видавництво «Левада», 2019. 204 с.

63. Kim M.-S., Akpudo U. E., Hur J.-W. A Study on Water-Induced Damage Severity on Diesel Engine Injection System Using Emulsified Diesel Fuels. *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 18. Art. 2285. DOI: 10.3390/electronics10182285. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics10182285>.

64. ISO 12937:2000. Petroleum products – Determination of water – Coulometric Karl Fischer titration method. Geneva: International Organization for Standardization, 2000. 11 p. URL: <https://www.iso.org/standard/2730.html>. (дата звернення: 10.09.2026).

65. Stępień Z. The influence of particulate contamination in diesel fuel on the damage to fuel injection systems. *Combustion Engines*. 2019. Vol. 177, No. 2. P. 76–82. DOI: 10.19206/CE-2019-213. URL: <https://doi.org/10.19206/CE-2019-213>.

66. Бурлака С. А., Купчук І. М., Ярощук Р. О., Тихий О. Technological aspects of the development of a mixed fuel filter for diesel and biofuels. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 1 (124). С. 41–46. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-5. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-1-5>.

67. Бурлака С. А. Diesel fuel ways and their elimination methods. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 3 (118). С. 26–30. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-4. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-4>.

68. Полєвода Ю. А., Бурлака С. А. Innovative methods of separation of glycerol-containing raw materials from biofuels. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 109–118. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-12. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4-12>.

69. Анісімов В. Ф., Яцковський В. І., Музичук В. І., Рябошапка В. Б., П'ясецький А. А. Зменшення впливу фізико-хімічних і біологічних особливостей біопалива на якість роботи двигуна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011. № 2 (62). С. 114–119.

70. Сафтьук Я. В., Штуць А. А. Вплив вмісту сірки в паливах на сільськогосподарські машини. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: матеріали І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 16 жовтня 2025 року. Кам'янець-Подільський, 2025. С. 230–232. URL: <https://surl.li/xjchdk>.

71. Рябошапка В. Б., Мельник В. Reasons for wear of plunger pairs and increasing their durability due to the use of biofuel. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 2 (125). С. 99–104. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-11. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-11>.

72. Музичук В. І., Рябошапка В. Б., Івацько В. П. Підвищення довговічності плунжерних пар паливного насосу високого тиску дизелів за рахунок використання біопалива. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 4

(111). С. 81–87. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-11. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-4-11>.

73. Бурлака С. А., Кравець С. М. Diagnosis of fuel equipment of diesel engine by removing vibro indicators of fuel supply. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 3 (114). С. 113–123. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-13. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-3-13>.

74. Борисюк Д. В., Твердохліб І. В., Купчук І. М., Цуркан О. В. Mathematical model of the automation of the Common Rail system diagnostic process of the YaMZ-5340 series engines. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 85–96. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-9. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-9>.

75. Анісімов В. Ф., Рябошапка В. Б., Ніщаків І. В., Беженар Ю. О. Аналіз методів поелементного діагностування автотракторних дизельних двигунів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 4 (131). С. 121–129. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-4-15. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-15>.

76. Анісімов В. Ф., Єленич А. П. Метод розпізнання технічного стану автотракторних двигунів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2 (117). С. 5–14. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-1. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-2-1>.

77. Сафтьок Я. В. Експрес-контроль сірковмісних сполук у паливі як елемент технічного сервісу сільськогосподарської техніки. Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції, 17-18 жовтня 2025 року, присвяченої 125-й річниці від дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Київ: НУБіП України, 2025. С. 515–516. URL: <https://surl.li/vubqfa>.

78. Анісімов В. Ф., Музичук В. І. Визначення залишкового ресурсу паливної апаратури автотракторних дизелів математичним моделюванням із застосуванням методу малих відхилень. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*.

2020. № 3 (110). С. 4–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-3-1. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-3-1>.

79. Muzychuk V., Tokarchuk O., Komaha V., Kukharchuk O. Research of residual lifetime of diesel engines fuel injection equipment by means of fuel injection mathematic simulation. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 4 (111). С. 33–47. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-4. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-4-4>.

80. Анісімов В. Ф., Рябошапка В. Б., Штуць А. А., Лисенко Р. Ways to improve the reliability and durability of automotive diesel engines. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 2 (129). С. 158–172. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-2-19. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-19>.

81. Кравець С. М. Diagnostics of diesel engine refrigeration elements and ways of increasing technical and economic indicators. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 35–44. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-4. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4-4>.

82. BSI. BS EN 590:2025. Automotive fuels. Diesel. Requirements and test methods. BSI Knowledge. URL: <https://knowledge.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030490604>. (дата звернення: 06.09.2026).

83. U. S. Department of Energy. Alternative Fuels Data Center: ASTM Biodiesel Specifications. URL: <https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel-specifications>. (дата звернення: 06.09.2026).

84. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне євро. Технічні умови (на заміну ДСТУ 4840:2007). Київ: Держспоживстандарт України, 2015. 18 с.

85. Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. *Official Journal of the European Union*. 2016. L 252/53. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj>. (дата звернення: 10.09.2026).

86. Постанова Кабінету Міністрів України від 19 листопада 2025 р. № 1482 «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до палив моторних альтернативних». Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1482-2025-%D0%BF>. (дата звернення: 17.08.2026).

87. Сафтюк Я. В. Необхідність розробки портативних експрес-засобів для вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах. *Perspectives of contemporary science: theory and practice: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 16-18 вересня 2024 року. Львів, Україна, 2024. С. 206–209.* URL: [https://drive.google.com/uc?export=download&confirm=no\\_antivirus&id=18jKcVskmX8fNw6uYXIpruV8-C6iOvlxp](https://drive.google.com/uc?export=download&confirm=no_antivirus&id=18jKcVskmX8fNw6uYXIpruV8-C6iOvlxp).

88. Сафтюк Я. В. Сучасні рішення та розвиток основних методів і засобів вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2024. Т. 341, № 5. С. 477–484. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-341-5-69; <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-69>. URL: <https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/444>.

89. Сафтюк Я. В. Огляд сучасних методів визначення сірки в нафтопродуктах. Проблеми, пріоритети та перспективи розвитку науки, освіти і суспільства в XXI столітті: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 15 червня 2024 року. Полтава, Україна, 2024. С. 55–56. URL: <https://www.economics.in.ua/2024/06/15.html>.

90. ASTM D4294-21. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

91. ASTM D2622-21. Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. 12 p.

92. ASTM D5453-19a. Standard Test Method for Determination of Total Sulfur in Light Hydrocarbons, Spark Ignition Engine Fuel, Diesel Engine Fuel, and

Engine Oil by Ultraviolet Fluorescence. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

93. Breitzkreitz M. C., Raimundo I. M., Rohwedder J. J. R., Pasquini C., Dantas Filho H. A., José G. E., Araújo M. C. U. Determination of total sulfur in diesel fuel employing NIR spectroscopy and multivariate calibration. *Analyst*. 2003. Vol. 128, No. 9. P. 1204–1207. DOI: 10.1039/B305265F. URL: <https://doi.org/10.1039/B305265F>.

94. Nespeca M. G., Hatanaka R. R., Flumignan D. L., de Oliveira J. E. Rapid and Simultaneous Prediction of Eight Diesel Quality Parameters through ATR-FTIR Analysis. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*. 2018. Vol. 2018. Art. 1795624. P. 1–10. DOI: 10.1155/2018/1795624. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/1795624>.

95. Correia R. M., Domingos E., Cáo V. M. et al. Portable near infrared spectroscopy applied to fuel quality control. *Talanta*. 2018. Vol. 176. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.talanta.2017.07.094. URL: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.07.094>.

96. Hradecká I., Velvarská R., Jaklová K. D. et al. Rapid determination of diesel fuel properties by near-infrared spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*. 2021. Vol. 119. Art. 103933. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103933. URL: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103933>.

97. dos Santos V. H. J. M., Ramos A. S., Pires J. P. et al. Discriminant analysis of biodiesel fuel blends based on combined data from Fourier Transform Infrared Spectroscopy and stable carbon isotope analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 161. P. 70–78. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.12.004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.12.004>.

98. Shtuts A., Saftyuk Y. Intelligent systems for improving the reliability of sulfur measurement in fuels. *Engineering, Energy, Transport AIC*. 2025. № 3 (130). P. 74–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-8. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-3-8>.

99. Штуць А. А., Сафтьок Я. В. Інфрачервона спектроскопія інструмент підвищення надійності інтелектуального аналізу сірковмісних сполук нафтових палив. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 359, № 6.2. С. 17–21. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-359-72. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-72>.

100. De Souza J. E., Scherer M. D., Cáceres J. A. S., Caires A. R. L., M'Peko J.-C. A close dielectric spectroscopic analysis of diesel/biodiesel blends and potential dielectric approaches for biodiesel content assessment. *Fuel*. 2013. Vol. 105. P. 705–710. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.09.032. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.032>.

101. ASTM D2624-26. Standard Test Methods for Electrical Conductivity of Aviation and Distillate Fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2026. DOI: 10.1520/D2624-26. URL: <https://doi.org/10.1520/D2624-26>. (дата звернення: 20.09.2026).

102. Diniz Carvalho C., Duailibe Barros Filho A. K., Lopes M. V., Silva F. C., Santana E. E., Sinfrônio F. S. M. Determination of the composition of biodiesel-diesel blends using the dielectric constant. *Instrumentation Science & Technology*. 2016. Vol. 44, No. 4. P. 377–385. DOI: 10.1080/10739149.2015.1131714. URL: <https://doi.org/10.1080/10739149.2015.1131714>.

103. Macioszek Ł., Rybski R. Low-Frequency Dielectric Spectroscopy Approach to Water Content in Winter Premium Diesel Fuel Assessment. *Progress Reports on Impedance Spectroscopy* / ed. by O. Kanoun. Berlin; Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2017. P. 73–80. DOI: 10.1515/9783110449822-008. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110449822-008>.

104. IEC 60247:2004. Insulating liquids – Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ( $\tan \delta$ ) and d.c. resistivity. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2004. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/1150>. (дата звернення: 10.09.2026).

105. Gajardo Narea V., Corach J., González M. G., Sorichetti P. A., Ciocci Brazzano L., Acosta E. O., Fernández Galván E. Dielectric properties sensor and its

application to biofuels. *Review of Scientific Instruments*. 2026. Vol. 97, No. 6. Art. 064702. DOI: 10.1063/5.0318158. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0318158>.

106. Guan L., Feng X. L., Xiong G. et al. Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. Vol. 168. No. 1. P. 22–29. DOI: 10.1016/j.sna.2011.03.033. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.03.033>.

107. Chen S. J., Chen Y. L., Chang Y. J. et al. Measurement of Electrical Discharge Machining Oil Quality by Analyzing Variations in the Equivalent Relative Permittivity of the Capacitive Sensor. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 21. Art. 6248. DOI: 10.3390/s20216248. URL: <https://doi.org/10.3390/s20216248>.

108. Skwarek V., Eggers T. A Low-cost Capacitive Fuel-level and Quality Sensor for Automotive Applications. *AMA Conferences 2013 – SENSOR 2013*. P. 680–685. DOI: 10.5162/sensor2013/P1.4. URL: <https://doi.org/10.5162/sensor2013/P1.4>.

109. Rochester Sensors. Capacitive Water-In-Fuel (WIF) Sensors. Official product information. Revised 27.05.2026. URL: <https://rochestersensors.com/product/capacitive-water-in-fuel-sensors/>. (дата звернення: 17.08.2026).

110. Loconsole A. M., Francione V. V., Portosi V., et al. Substrate-Integrated Waveguide Microwave Sensor for Water-in-Diesel Fuel Applications. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Art. 10454. DOI: 10.3390/app112110454. URL: <https://doi.org/10.3390/app112110454>.

111. Sparma F., Tallawi B., Georgin E., Sabouroux P. Multi-Probe Sensor for Water Content Diagnosis of Liquid Biofuels. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2022. Vol. 106. P. 1–6. DOI: 10.2528/PIERL22021104. URL: <https://doi.org/10.2528/PIERL22021104>.

112. Гончарук І. В., Граняк В. Ф., Токарчук О. А., Сафтьок Я. В. Патент України на корисну модель. Вимірювальна насадка вмісту сірки в скрапленому газі. № 159188 Україна. МПК G01N21/00, G01N21/01. № u202401656; заяв. від 03.04.2024 р. опубл. 07.05.2025, бюл. № 19/2025.

113. Сафтюк Я. В. Обґрунтування структури інтеграції датчика контролю шкідливих домішок у паливну систему тракторів. *Машинобудування, агроінженерія та автомобільний транспорт: інновації і перспективи розвитку: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції*, 21 травня 2026 року. Полтава: ПДАУ, 2026. С. 122–123. URL: [https://drive.google.com/drive/folders/1T4tvZ1B3geiF\\_T7A5XE7ZHY8MTJqb62g](https://drive.google.com/drive/folders/1T4tvZ1B3geiF_T7A5XE7ZHY8MTJqb62g).

114. Гунько І. В., Бурлака С. А., П'ясецький А. А. Система паливоподачі дизельного двигуна з електронним регулюванням складу дозованої паливної суміші. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 97. С. 47–51.

115. Бурлака С. А., Ярошук Р. О., Митко М., Борецька Т. Оптимізація споживання біопалива шляхом розроблення адаптивного алгоритму керування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128). С. 37–44. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-4. URL: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-4>.

116. Corach J., Sorichetti P. A., Romano S. D. Permittivity of diesel fossil fuel and blends with biodiesel in the full range from 0% to 100%: Application to biodiesel content estimation. *Fuel*. 2017. Vol. 188. P. 367–373. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.10.019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.019>.

117. Markel V. A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*. 2016. Vol. 33, No. 7. P. 1244–1256. DOI: 10.1364/JOSAA.33.001244. URL: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.001244>.

118. Goncharenko A. V., Silkin V. M. A Century of General Lichtenecker Equation: Between Stringency and Empiricism, Accuracy and Approximability. *Materials*. 2025. Vol. 18, No. 24. Art. 5562. DOI: 10.3390/ma18245562. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18245562>.

119. dos Santos-Neto I. S., Carvalho C. D., Araújo Filho G. B. et al. Interdigitated Electrode for Electrical Characterization of Commercial Pseudo-Binary Biodiesel–Diesel Blends. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 21. Art. 7288. DOI: 10.3390/s21217288. URL: <https://doi.org/10.3390/s21217288>.

120. Cole K. S., Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *The Journal of Chemical Physics*. 1941. Vol. 9.

No. 4. P. 341–351. DOI: 10.1063/1.1750906. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1750906>.

121. OpenStax. University Physics. Volume 2. Section 10.5: RC Circuits. URL: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits>. (дата звернення: 09.09.2026).

122. Sumartono H., Al Huda M., Tk B. F., Widodo A., Dzulfikar F., Suryana N., Muhamed A., Isa I. M., Bakar S. A., Nuryadi R. Improved Low Concentration Water Content Detection in Biodiesel Utilizing Phase-Shift-Based Capacitive Method. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, No. 24. P. 41981–41988. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3483290. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3483290>.

123. NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods. Section 5.3.3.6: Response surface designs. URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri336.htm>. (дата звернення: 09.09.2026).

124. NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods. Section 2.3.6: Instrument calibration over a regime. URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/mpc/section3/mpc36.htm>. (дата звернення: 09.09.2026).

125. Штуць А. А., Сафтьок Я. В. Програма та методика експериментальних досліджень діелектричного методу експрес-контролю вмісту шкідливих домішок у дизельному паливі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2026. № 2 (121). С. 75–81. DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-9. URL: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2026-2-9>.

126. Штуць А. А., Сафтьок Я. В. Математична модель контролю забрудненості палива за діелектричною проникністю в системах живлення дизельних двигунів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2026. Вип. 3(158). С. 114–121.

127. Наглюк М. І. Діагностування охолоджуючих рідин автомобільних двигунів за енергетичним параметром : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20. Харків : Харківський національний автомобільно-дорожній

університет, 2015. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/e88b07cd-f2e6-4af7-b460-e0c3dad9fd6b/download>. (дата звернення: 20.09.2026).

128. Zhu X., Zhong C., Zhe J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring – A review. *Tribology International*. 2017. Vol. 109. P. 473–484. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.01.015. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.015>.

129. Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*. 2009. Vol. 50. No. 1. P. 14–34. DOI: 10.1016/j.enconman.2008.09.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001>.

130. Mahmudul H. M., Hagos F. Y., Mamat R. et al. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 72. P. 497–509. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>.

131. Samet M., Kallel A., Serghei A. Maxwell-Wagner-Sillars interfacial polarization in dielectric spectra of composite materials: Scaling laws and applications. *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 56. No. 20. P. 3197–3217. DOI: 10.1177/00219983221090629. URL: <https://doi.org/10.1177/00219983221090629>.

132. Гусачук Д. А., Фешук Ю. П., Фурс Т. В. Оцінювання якості дизельного палива за густиною і в'язкістю. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 1 (88). С. 27–31. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.1.3. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.3>.

133. Kutia M., Mukhin N., Petrova H. et al. Sensor for the evaluation of dielectric properties of sulfur-containing heteroatomic hydrocarbon compounds in petroleum based liquids at a microfluidic scale. *AIP Advances*. 2020. Vol. 10. No. 2. Art. 025006. DOI: 10.1063/1.5141482. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5141482>.

134. France-Lanord A., Grossman J. C. Correlations from Ion Pairing and the Nernst-Einstein Equation. *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 122. No. 13. Art.

136001. DOI: 10.1103/physrevlett.122.136001. URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.136001>.

135. Gong Y., Guan L., Feng X. et al. In-situ lubricating oil condition sensing method based on two-channel and differential dielectric spectroscopy combined with supervised hierarchical clustering analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2016. Vol. 158. P. 155–164. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.09.004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.09.004>.

136. Yang D., Zhang X., Hu Z. et al. Oil Contamination Monitoring Based on Dielectric Constant Measurement. *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2009. P. 249–252. DOI: 10.1109/icmtma.2009.588. URL: <https://doi.org/10.1109/icmtma.2009.588>.

137. COMSOL. Introduction to the AC/DC Module. Version 6.4. URL: <https://doc.comsol.com/6.4/doc/com.comsol.help.acdc/IntroductionToACDCModule.pdf>. (дата звернення: 09.09.2026).

138. Kalghatgi G. Fuel/Engine Interactions. Warrendale, PA : SAE International, 2013. DOI: 10.4271/R-409. URL: <https://doi.org/10.4271/R-409>. (дата звернення: 20.09.2026).

139. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E. URL: <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>. (дата звернення: 20.09.2026).

140. AT-Euro. Паливний насос AT 9011-001FP : каталог продукції. URL: <https://www.at-euro.com.ua/ru/dvigatel/systema-toplivnaya/at-9011-001fp/>. (дата звернення: 11.09.2026).

141. PCE Instruments. Magnetic Stirrer PCE-MSR 10 : technical specifications. URL: [https://www.pce-instruments.com/english/laboratory-technology/laboratory/magnetic-stirrer-pce-instruments-magnetic-stirrer-pce-msr-10-det\\_6248453.htm](https://www.pce-instruments.com/english/laboratory-technology/laboratory/magnetic-stirrer-pce-instruments-magnetic-stirrer-pce-msr-10-det_6248453.htm). (дата звернення: 11.09.2026).

142. OWON. XDS3000-E Series Digital Oscilloscope : technical specifications. URL: [https://www.owon.com.hk/products\\_owon\\_xds3000-e\\_series\\_4ch\\_8\\_%7C\\_14bit\\_touchscreen\\_digital\\_oscilloscope](https://www.owon.com.hk/products_owon_xds3000-e_series_4ch_8_%7C_14bit_touchscreen_digital_oscilloscope). (дата звернення: 11.09.2026).

143. Сібілева О. В. Якість автомобільних бензинів та дизельного пального на ринку України. *Екологічні науки*. 2022. № 4 (43). С. 100–106. DOI: 10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.16. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.16>.

144. Крайнюк О. В., Буц Ю. В., Барбашин В. В. Контроль якості характеристик моторних палив з метою забезпечення відповідності вимогам безпеки. *Вісник ХНАДУ*. 2019. Вип. 86. Т. 1. С. 80–89. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.1.80. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.1.80>.

145. Мітков Б. В., Мітков В. Б., Ігнат'єв Є. І., Лиса Ю. Ю. Вплив якості палива, пропонованого АЗС України, на роботу двигунів внутрішнього згоряння. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2013. Вип. 3. Т. 1. С. 40–50. URL: <https://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/V13T1.html>.

146. NIST/SEMATECH. e-Handbook of Statistical Methods. Section 1.3.5.3. Two-Sample t-Test for Equal Means. URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda353.htm>. (дата звернення: 20.09.2026).

147. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 2018. 1056 p. ISBN: 978-1-26-011610-6.

148. Bejger A., Gawdzińska K. Fuel System Contamination Affecting Injection Equipment of Diesel Engines. *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 817. P. 27–33. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.817.27. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.817.27>.

149. ISO 16332:2018. Diesel engines – Fuel filters – Method for evaluating fuel/water separation efficiency. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/44294.html>. (дата звернення: 13.09.2026).

150. ISO 19438:2023. Diesel fuel and petrol filters for internal combustion engines – Filtration efficiency using particle counting and contaminant retention capacity. Geneva : International Organization for Standardization, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/82268.html>. (дата звернення: 13.09.2026).

151. Миронюк О., Шевчук В., Паславський Р. Дослідження двоступінчатого фільтра тонкої очистки дизельного пального. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2021. № 25. С. 49–56. DOI: 10.31734/agroengineering2021.25.049. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.049>.

152. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. 4th ed. London : Palgrave Macmillan, 2012. 450 p. DOI: 10.1007/978-1-137-02829-7. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-137-02829-7>; <https://www.bloomsbury.com/uk/introduction-to-internal-combustion-engines-9781137028297/>. (дата звернення: 20.09.2026).

153. Пожидаєв І. Г., Ліньков О. Ю. Керування подачею палива системою акумуляторного типу з метою зменшення втрат на привід насоса. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2025. № 2. С. 33–36. DOI: 10.20998/0419-8719.2025.2.04. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2025.2.04>.

154. Shandong Huayuan Laidong Engine Co., Ltd. KM385BT Laidong High Quality Factory Price Multi-Cylinder Diesel Engine. URL: <https://hyldgjyw.en.made-in-china.com/product/SwZTRYAchGpe/China-Km385bt-Laidong-High-Quality-Factory-Price-Multi-Cylinder-Diesel-Engine.html>. (дата звернення: 10.09.2026).

## ДОДАТОК А

### Ліцензійна угода COMSOL Multiphysics 5.6

Наданий фрагмент документа COMSOL Software License Agreement



#### COMSOL Software License Agreement

© 1989-2025 COMSOL.  
 Prepared by patents filed on [www.comsol.com/patents](http://www.comsol.com/patents) and U.S. Patents 7,519,518; 7,596,474; 7,623,991; 8,318,272; 8,457,932; 8,626,475; 8,949,009; 9,054,302; 9,098,106; 9,140,652; 9,208,270; 9,323,503; 9,372,672; 9,454,628; 10,019,544; 10,650,177; and 10,776,541. Patent pending.  
 This Documentation and the Programs described herein are furnished under the COMSOL Software License Agreement ([www.comsol.com/comsol-software-license-agreement](http://www.comsol.com/comsol-software-license-agreement)) and may be used or copied only under the terms of the license agreement. Portions of this software are owned by Scimed Product Lifecycle Management Software Inc. © 1989-2020. All Rights Reserved. Portions of this software are owned by Spatial Corp. © 1989-2020. All Rights Reserved.  
 COMSOL, the COMSOL logo, COMSOL Multiphysics, COMSOL Desktop, COMSOL Compiler, COMSOL Server, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. AutoDesk, AutoCAD, Inventor and Revit are registered trademarks or trademarks of Autodesk, Inc., and/or its subsidiaries and/or affiliates in the USA and/or other countries. Solid Edge is a registered trademark of Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. or its subsidiaries in the United States and in other countries. SOLIDWORKS is a registered trademark of Dassault Systèmes SolidWorks Corp., LLC, Croy, Conn. Parametric and Pro-ENGINEER are trademarks or registered trademarks of PTC, Inc. or its subsidiaries in the U.S. and in other countries. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by these or the above non-COMSOL trademark owners. For a list of such trademark owners, see [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks).  
 Version: COMSOL 5.6

#### Contact Information

Visit the Contact COMSOL page at [www.comsol.com/contact](http://www.comsol.com/contact) to submit general inquiries, contact Technical Support, or search for an address and phone number. You can also visit the Worldwide Sales Offices page at [www.comsol.com/contact/offices](http://www.comsol.com/contact/offices) for address and contact information.

If you need to contact Support, an online request form is located at the COMSOL Access page at [www.comsol.com/support/case](http://www.comsol.com/support/case). Other useful links include:

- Support Center: [www.comsol.com/support](http://www.comsol.com/support)
- Product Download: [www.comsol.com/product-download](http://www.comsol.com/product-download)
- Product Updates: [www.comsol.com/support/updates](http://www.comsol.com/support/updates)
- COMSOL Blog: [www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs)
- Discussion Forum: [www.comsol.com/community](http://www.comsol.com/community)
- Events: [www.comsol.com/events](http://www.comsol.com/events)
- Video Tutorial: [www.comsol.com/videos](http://www.comsol.com/videos)
- Support Knowledge Base: [www.comsol.com/support/knowledgebase](http://www.comsol.com/support/knowledgebase)

Part number: CM010005

#### COMSOL Software License Agreement

CAREFULLY READ THE TERMS AND CONDITIONS BELOW AND IN ANY APPLICABLE ADDENDUM (HEREINAFTER, "TERMS AND CONDITIONS") BEFORE INSTALLING OR USING THE PROGRAMS OR DOCUMENTATION. YOUR RIGHT TO USE ANY PROGRAMS AND DOCUMENTATION IS CONDITIONED ON ACCEPTANCE OF, AND COMPLIANCE WITH, THESE TERMS AND CONDITIONS. INSTALLING OR USING THE PROGRAMS MEANS YOU HAVE ACCEPTED THE TERMS AND CONDITIONS. IF YOU DO NOT ACCEPT THE TERMS AND CONDITIONS, RETURN THE PROGRAMS AND RELATED MATERIAL UNUSED TO YOUR VENDOR FOR A REFUND OR CEASE ANY AND ALL ATTEMPTS TO DOWNLOAD AND INSTALL THE PROGRAMS AND DELETE ANY MATERIAL DOWNLOADED. ANY THIRD PARTY HIRED TO INSTALL THE PROGRAMS ON BEHALF OF THE PURCHASER OF A LICENSE THEREBY WHO CLICKS HIS/HER ACCEPTANCE OF THESE TERMS AND CONDITIONS UPON INSTALLATION HEREBY REPRESENTS AND WARRANTS THAT HE/SHE IS AUTHORIZED BY THE PURCHASER OF THE LICENSE TO ACCEPT SUCH TERMS AND CONDITIONS ON THE PURCHASER'S BEHALF.

- 1 Definitions.** The following words and phrases shall have the definitions set forth below throughout this Agreement, regardless of whether or not such words or phrases are capitalized:
- a** The term "Academic Price" shall mean the price for which we sell licenses to the Programs to Institutions after applying our educational discount for usage of the Programs that meet the requirements of the Academic Addendum to this Agreement.
  - b** The term "Agreement" shall mean the terms and conditions contained in this document, delivered upon installation of the Programs.
  - c** The term "Affiliate" shall mean a legal entity having a relationship with a second legal entity such that the two entities are under common control.
  - d** The term "Application" shall mean (i) the output that is produced by using the Application Builder feature of the Programs (with or without modification using the COMSOL API) or (ii) the output that is produced by using the COMSOL API to enable interoperability between a Model and an external user interface.
  - e** The term "ASL" shall mean an academic server license for the Programs having the rights set forth in Section 4 of the Academic Addendum.
  - f** The term "CRL" shall mean a class kit license for the Programs having the rights set forth in Section 3 of the Academic Addendum.
  - g** The term "Compiled Application" shall mean the output produced by using the COMSOL Compiler, including the runtime libraries supporting such Applications when completed.
  - h** The term "COMSOL API" shall mean the set of commands constituting the Programs' application programming interface, which the Programs will accept when input from a Java program, from a Visual Basic for Applications program

with LiveLink™ for Excel®, or from a MATLAB® program with LiveLink™ for MATLAB® or LiveLink™ for Simulink®, and which enables Model creation or customization of the elements of a Model or Application that are exposed for end use and the addition of functionality.

- i** The term "COMSOL Client License Agreement" shall mean the electronic end-user license agreement from us that is displayed automatically when you install the COMSOL Client software.
- j** The term "COMSOL Runtime License Agreement" shall mean the electronic end-user license agreement from us that is displayed automatically the first time a user uses a Compiled Application.
- k** The term "COMSOL Server License Agreement" shall mean the electronic end-user license agreement from us that is displayed automatically when you install COMSOL Server.
- l** The term "Confidential Information" shall mean: (i) with respect to our information and information of our suppliers, the Programs, together with any other non-public information learned in connection therewith that should reasonably be considered confidential under the circumstances; (ii) with respect to your information, any and all information and files submitted to us through the web page <https://secure.comsol.com/support/confidential> or, in the case of items subject to U.S. export control restrictions, to [us-export.comsol@comsol.com](mailto:us-export.comsol@comsol.com), that derives actual or potential economic value from being kept confidential.
- m** The term "Control" shall mean a relationship between one legal entity and a second legal entity whereby (a) the first entity owns a majority percentage of the voting shares of stock of the second entity; (b) the first entity is a shareholder or member of the second entity and has the right to appoint or remove a majority of the board of directors of the second entity; or (c) the first entity is a shareholder or member of the second entity and has the right, pursuant to agreement, to exercise or direct the exercise of a majority percentage of the voting rights in the second entity.
- n** The term "CPU" shall mean a CPU-locked single user license for the Programs having the rights set forth in Section 2(b)(ii).
- o** The term "CRL" shall mean a server license for the Programs having the rights set forth in Section 2(b)(v).
- p** The term "Documentation" shall mean all instruction manuals, user guides, operating guides, and other reference materials, including Examples, accompanying the Programs or published by us on [www.comsol.com](http://www.comsol.com) for use with the Programs.
- q** The term "Examples" shall mean samples provided by us for use with the Programs, which we provide either with the Programs in the "applications" and "demos" folders of the directory for your installation of the Programs or through the Application Gallery at [www.comsol.com](http://www.comsol.com) or through the Application Library

## ДОДАТОК Б

### Програмна реалізація зчитування, нормування та індикації сигналу СМЯСП

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <CapacitiveSensor.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

const uint8_t LED_G=8, LED_Y=9, LED_R=10;
const uint8_t LCD_ADDR=0x27, SAMPLES=30, REPEATS=5;
const float CLEAN_DELTA=0.20f, WARN_DELTA=0.50f;
const float HYST=0.05f; // fraction of the recorded air baseline
CapacitiveSensor cs(4,2);
LiquidCrystal_I2C lcd(LCD_ADDR,16,2);
float rawBase=0, refMin=0, refMax=0;
bool baseReady=false, refsReady=false;
uint8_t state=0;
char command[51]; uint8_t used=0;
bool overflow=false;

bool average(uint8_t count, uint16_t pauseMs, float &value) {
    double sum=0;
    for (uint8_t i=0; i<count; ++i) {
        long sample=cs.capacitiveSensorRaw(SAMPLES);
        if (sample<0) return false; // never replace errors with 1
        sum+=sample;
        delay(pauseMs);
    }
    value=sum/count;
    return isfinite(value);
}

void leds(bool g, bool y, bool r) {
    digitalWrite(LED_G,g); digitalWrite(LED_Y,y);
    digitalWrite(LED_R,r);
}

float normalised(float raw) {
    return 1.0f+99.0f*(raw-refMin)/(refMax-refMin);
}
```

```

void updateState(float raw) {
    float lo=rawBase+rawBase*CLEAN_DELTA;
    float hi=rawBase+rawBase*WARN_DELTA, h=rawBase*HYST;
    if (state==0) {
        if (raw>=hi) state=2;
        else if (raw>=lo) state=1;
    } else if (state==1) {
        if (raw>=hi) state=2;
        else if (raw<lo-h) state=0;
    } else if (raw<hi-h) {
        state=(raw<lo-h)?0:1;
    }
}

void runCommand() {
    // Send a only with the sensor empty, clean and dry.
    // Send r MIN MAX to set common reference readings.
    // Example syntax: r 100 200 (replace with measured references).
    if (command[0]=='a' && command[1]=='\0') {
        float value;
        baseReady=false; leds(false,false,false);
        if (average(20,100,value) && value>0) {
            rawBase=value; baseReady=true; state=0;
            Serial.print(F("AIR_BASE=")); Serial.println(rawBase,3);
        } else Serial.println(F("ERROR: air baseline"));
    } else if (command[0]=='r' && command[1]==' ') {
        char *end1, *end2;
        float lo=strtod(command+2,&end1);
        float hi=strtod(end1,&end2);
        bool parsedSecond=(end2!=end1);
        while (*end2==' ') ++end2;
        if (end1!=command+2 && parsedSecond && *end2=='\0' &&
            isfinite(lo) && isfinite(hi) && hi>lo) {
            refMin=lo; refMax=hi; refsReady=true;
            Serial.println(F("REFERENCES SET"));
        } else Serial.println(F("ERROR: references"));
    } else Serial.println(F("Commands: a | r MIN MAX"));
}

void receiveCommands() {
    while (Serial.available()) {
        char c=Serial.read();
        if (c=='\r') continue;
        if (c=='\n') {
            command[used]='\0';
            if (!overflow && used) runCommand();
            if (overflow) Serial.println(F("ERROR: command length"));
            used=0; overflow=false;
        } else if (used<sizeof(command)-1) command[used++]=c;
        else overflow=true;
    }
}

```

```

void setup() {
  pinMode(LED_G,OUTPUT); pinMode(LED_Y,OUTPUT);
  pinMode(LED_R,OUTPUT); leds(false,false,false);
  Serial.begin(9600); Wire.begin(); lcd.init(); lcd.backlight();
  cs.set_CS_Timeout_Millis(1000);
  cs.set_CS_AutocaL_Millis(0xFFFFFFFFUL);
  Serial.println(F("raw,I_unclipped,state; a | r MIN MAX"));
  // Reference values remain unset until entered explicitly.
  // 20/50% thresholds reproduce the fragment's indication logic;
  // they are not established fuel-quality or impurity limits.
}

void loop() {
  receiveCommands();
  float raw;
  if (!average(REPEATS,5,raw)) {
    leds(false,false,(millis()/250)%2);
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print(F("SENSOR ERROR  "));
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print(F("Check wiring  "));
    Serial.println(F("ERROR: sensor")); delay(200); return;
  }
  if (baseReady) {
    updateState(raw); leds(state==0,state==1,state==2);
  } else leds(false,false,false);
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(F("          "));
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(F("Raw:")); lcd.print(raw,1);
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print(F("          "));
  lcd.setCursor(0,1);
  if (refsReady) {
    float i=normalised(raw);
    lcd.print(F("I:")); lcd.print(constrain(i,1.0f,100.0f),1);
  } else lcd.print(F("I:--"));
  lcd.setCursor(8,1);
  if (!baseReady) lcd.print(F("SET BASE"));
  else if (state==0) lcd.print(F("CLEAN FUEL "));
  else if (state==1) lcd.print(F("CHECK FUEL "));
  else lcd.print(F("CONTAMINATED FUEL "));
  Serial.print(raw,3); Serial.print(',');
  if (refsReady) Serial.print(normalised(raw),3);
  else Serial.print(F("NA"));
  Serial.print(',');
  if (baseReady) Serial.println(state);
  else Serial.println(F("NA"));
  delay(200);
}

```

## ДОДАТОК В

Матриця планування повного факторного експерименту

Таблиця В.1

*Матриця планування повного факторного експерименту 3<sup>3</sup>*

| №  | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $B, \%$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $A, \text{см}^2$ |
|----|-------|-------|-------|---------|---------------------|------------------|
| 1  | -1    | -1    | -1    | 0       | 10                  | 0,5              |
| 2  | -1    | -1    | 0     | 0       | 10                  | 1,0              |
| 3  | -1    | -1    | 1     | 0       | 10                  | 1,5              |
| 4  | -1    | 0     | -1    | 0       | 20                  | 0,5              |
| 5  | -1    | 0     | 0     | 0       | 20                  | 1,0              |
| 6  | -1    | 0     | 1     | 0       | 20                  | 1,5              |
| 7  | -1    | 1     | -1    | 0       | 30                  | 0,5              |
| 8  | -1    | 1     | 0     | 0       | 30                  | 1,0              |
| 9  | -1    | 1     | 1     | 0       | 30                  | 1,5              |
| 10 | 0     | -1    | -1    | 50      | 10                  | 0,5              |
| 11 | 0     | -1    | 0     | 50      | 10                  | 1,0              |
| 12 | 0     | -1    | 1     | 50      | 10                  | 1,5              |
| 13 | 0     | 0     | -1    | 50      | 20                  | 0,5              |
| 14 | 0     | 0     | 0     | 50      | 20                  | 1,0              |
| 15 | 0     | 0     | 1     | 50      | 20                  | 1,5              |
| 16 | 0     | 1     | -1    | 50      | 30                  | 0,5              |
| 17 | 0     | 1     | 0     | 50      | 30                  | 1,0              |
| 18 | 0     | 1     | 1     | 50      | 30                  | 1,5              |
| 19 | 1     | -1    | -1    | 100     | 10                  | 0,5              |
| 20 | 1     | -1    | 0     | 100     | 10                  | 1,0              |
| 21 | 1     | -1    | 1     | 100     | 10                  | 1,5              |
| 22 | 1     | 0     | -1    | 100     | 20                  | 0,5              |
| 23 | 1     | 0     | 0     | 100     | 20                  | 1,0              |
| 24 | 1     | 0     | 1     | 100     | 20                  | 1,5              |
| 25 | 1     | 1     | -1    | 100     | 30                  | 0,5              |
| 26 | 1     | 1     | 0     | 100     | 30                  | 1,0              |
| 27 | 1     | 1     | 1     | 100     | 30                  | 1,5              |

## ДОДАТОК Г

Експериментальні та розрахункові значення вихідного сигналу СМЯСП

Таблиця Г.1

**Експериментальні та розрахункові значення вихідного сигналу у і  
залишки регресії**

| №  | B, % | T, °C | A, см² | y, ум. од. | $\hat{y}$ , ум. од. | e, ум. од. |
|----|------|-------|--------|------------|---------------------|------------|
| 1  | 0    | 10    | 0,5    | 31,84416   | 34,89840            | -3,05424   |
| 2  | 0    | 10    | 1,0    | 37,82895   | 46,02530            | -8,19635   |
| 3  | 0    | 10    | 1,5    | 40,75870   | 43,89940            | -3,14070   |
| 4  | 0    | 20    | 0,5    | 31,17880   | 29,90010            | 1,27870    |
| 5  | 0    | 20    | 1,0    | 38,56656   | 37,58090            | 0,98566    |
| 6  | 0    | 20    | 1,5    | 35,77555   | 32,00890            | 3,76665    |
| 7  | 0    | 30    | 0,5    | 34,35837   | 37,18140            | -2,82303   |
| 8  | 0    | 30    | 1,0    | 37,15216   | 41,41610            | -4,26394   |
| 9  | 0    | 30    | 1,5    | 34,51204   | 32,39800            | 2,11404    |
| 10 | 50   | 10    | 0,5    | 43,24210   | 46,68510            | -3,44300   |
| 11 | 50   | 10    | 1,0    | 58,88440   | 62,59510            | -3,71070   |
| 12 | 50   | 10    | 1,5    | 59,56281   | 65,25230            | -5,68949   |
| 13 | 50   | 20    | 0,5    | 41,88481   | 38,63850            | 3,24631    |
| 14 | 50   | 20    | 1,0    | 48,46938   | 51,10240            | -2,63302   |
| 15 | 50   | 20    | 1,5    | 50,46094   | 50,31350            | 0,14744    |
| 16 | 50   | 30    | 0,5    | 39,85224   | 42,87150            | -3,01926   |
| 17 | 50   | 30    | 1,0    | 49,61361   | 51,88930            | -2,27569   |
| 18 | 50   | 30    | 1,5    | 49,24932   | 47,65430            | 1,59502    |
| 19 | 100  | 10    | 0,5    | 46,25377   | 48,34820            | -2,09443   |
| 20 | 100  | 10    | 1,0    | 63,27676   | 69,04130            | -5,76454   |
| 21 | 100  | 10    | 1,5    | 68,80589   | 76,48160            | -7,67571   |
| 22 | 100  | 20    | 0,5    | 40,33061   | 37,25330            | 3,07731    |
| 23 | 100  | 20    | 1,0    | 50,79607   | 54,50030            | -3,70423   |
| 24 | 100  | 20    | 1,5    | 60,08699   | 58,49450            | 1,59249    |
| 25 | 100  | 30    | 0,5    | 36,70119   | 38,43800            | -1,73681   |
| 26 | 100  | 30    | 1,0    | 44,97862   | 52,23890            | -7,26028   |
| 27 | 100  | 30    | 1,5    | 55,73203   | 52,78700            | 2,94503    |

## ДОДАТОК Д

### Програмний код побудови поверхонь відгуку СМЯСП у середовищі

#### OriginPro

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# Run inside OriginPro
import numpy as np
import originpro as op

def signal(B, T, A):
    x1 = (B - 50.0) / 50.0
    x2 = (T - 20.0) / 10.0
    x3 = (A - 1.0) / 0.5
    return (51.1024 + 8.4597*x1
            - 5.3529*x2 + 5.8375*x3
            - 3.0483*x1*x2 + 4.7831*x1*x3
            - 3.4461*x2*x3 - 5.0618*x1*x1
            + 6.1398*x2*x2 - 6.6264*x3*x3)

def surface(pair, fixed):
    limits = {'B': (0, 100), 'T': (10, 30), 'A': (0.5, 1.5)}
    labels = {'B': 'Biofuel proportion B (%)',
              'T': 'Fuel temperature T (degC)',
              'A': 'Electrode overlap area A (cm2)'}
    u, v = pair
    w = next(k for k in limits if k not in pair)
    U, V = np.meshgrid(np.linspace(*limits[u], 41),
                       np.linspace(*limits[v], 41))
    values = {u: U, v: V, w: fixed}
    Z = signal(values['B'], values['T'], values['A'])
    title = f'{u}-{v}; {w}={fixed:g}'
    sheet = op.new_sheet('w', lname=title)
    sheet.from_list(0, U.ravel().tolist())
    sheet.from_list(1, V.ravel().tolist())
    sheet.from_list(2, Z.ravel().tolist())
    sheet.cols_axis('xyz')
    graph = op.new_graph(template='glCMAP', lname=title)
    layer = graph[0]
    plot = layer.add_plot(sheet, colx=0, coly=1, colz=2, type=103)
    layer.rescale()
    layer.axis('x').title = labels[u]
    layer.axis('y').title = labels[v]
    layer.axis('z').title = 'Calculated output (a.u.)'
    return graph

# Figure 4.16: B and T at fixed electrode area A.
for A in (0.5, 1.0, 1.5):
    surface(('B', 'T'), A)
# Figure 4.17: B and A at fixed temperature T.
for T in (10, 20, 30):
    surface(('B', 'A'), T)
# Figure 4.18: T and A at fixed biofuel proportion B.
for B in (0, 50, 100):
    surface(('T', 'A'), B)

print('Created 9 response surfaces and their XYZ worksheets.')
```

## ДОДАТОК Е

## Акт впровадження результатів дослідження в ТОВ «Промавтоматика-Вінниця»

З А Т В Е Р Д Ж У Ю  
Перший проректор  
Вінницького національного  
аграрного університету  
Світлана ЛУТКОВСЬКА  
2026 р.

З А Т В Е Р Д Ж У Ю  
Генеральний директор  
ТОВ «Промавтоматика-Вінниця»  
Михайло ГАНЧУК  
2026 р.

**АКТ**  
про впровадження/використання результатів  
науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, отримані здобувачем освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» Сафтьком Ярославом Владиславовичем під керівництвом кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (ЄДРПОУ 00497236, Україна, 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3) Штуця Андрія Анатолійовича, впроваджені та використані у діяльності ТОВ «Промавтоматика-Вінниця» (ТОВ «Промавтоматика-Вінниця» ЄДРПОУ 34849153, 21029, Україна, Вінницька обл., м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 145).

ТОВ «Промавтоматика-Вінниця» отримало рекомендації щодо застосування ємнісного датчика діелектричної проникності, розробленого у Вінницькому національному аграрному університеті в межах виконання дисертаційного дослідження.

Надані рекомендації охоплюють метод вимірювання діелектричної проникності, раціональні конструктивні параметри вимірювальної комірки (площу електродів та зазор), порогові значення вихідного сигналу та режими роботи засобу, що забезпечують оперативний неруйнівний контроль контрольованого середовища. ТОВ «Промавтоматика-Вінниця» зацікавлене у подальшому застосуванні запропонованих рекомендацій у процесі розроблення, налаштування та експлуатації засобів автоматизованого контролю і вимірювання.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання результатів науково-технічної роботи визначаються окремими договорами.

Від ВНАУ:  
Науковий керівник, к.т.н., доцент,  
завідувач кафедри ЕЕЕ  
Андрій ШТУЦЬ

Здобувач освітньо-наукового ступеня  
доктора філософії за спеціальністю  
133 «Галузеве машинобудування»  
Ярослав САФТЮК

«22» травня 2026 р.

Від ТОВ «Промавтоматика-Вінниця»  
Комерційний директор  
Владислав ШТОЙКО

«22» травня 2026 р.

## ДОДАТОК Ж

## Акт впровадження результатів дослідження в ТОВ «СФГ Максима»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор  
Вінницького національного  
аграрного університетуСвітлана ЛУТКОВСЬКА  
«14» Травня 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор  
ТОВ «СФГ Максима»Валерій БОРИСОВ  
«14» Травня 2026 р.

## АКТ

про впровадження/використання результатів  
науково-дослідної роботи

Даним актом підтверджується, що ТОВ «СФГ Максима» (ЄДРПОУ 43168006, 21050, м. Вінниця, вул. Артинова, 12, каб. 4) в особі генерального директора Борисова Валерія Віталійовича отримало науково-дослідні рекомендації та матеріали щодо розроблення засобу оцінювання властивостей об'єктів контролю за зміною їх діелектричної проникності, розроблені у Вінницькому національному аграрному університеті (ЄДРПОУ 00497236, Україна, 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3) у межах виконання науково-дослідних робіт.

Розробка виконана, зокрема за тематикою дисертаційного дослідження здобувача освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» Сафтьюка Ярослава Владиславовича під науковим керівництвом кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки інженерно-технологічного факультету Штуця Андрія Анатолійовича.

Отримані матеріали відображають результати науково-дослідної роботи щодо обґрунтування принципу дії датчика діелектричної проникності, структурної побудови засобу вимірювання та перетворення вимірювального сигналу.

Наведені науково-технічні рекомендації можуть бути використані під час виконання подальших науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, а також при розробленні технічних засобів автоматизованого контролю параметрів технологічних процесів.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУ:

Науковий керівник, к.т.н., доцент,  
завідувач кафедри ЕЕЕ

Андрій ШТУЦЬ

Здобувач освітньо-наукового ступеня  
доктора філософії за спеціальністю  
133 «Галузеве машинобудування»  
Ярослав САФТЮК«14» Травня 2026 р.

Від ТОВ «СФГ Максима»

Генеральний директор

Валерій БОРИСОВ

«14» Травня 2026 р.

## ДОДАТОК II

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙ НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ  
КОНФЕРЕНЦІЯХ

за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

Сафтіюка Ярослава Владиславовича

| №<br>п/п                                                                   | Тема доповіді                                                                                                                               | Назва конференцій, дата, місце проведення                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях</b> |                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                 |
| 1                                                                          | Огляд сучасних методів визначення сірки в нафтопродуктах                                                                                    | Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, пріоритети та перспективи розвитку науки, освіти і суспільства в XXI столітті». Полтава, 15 червня 2024 р.                                                  |
| 2                                                                          | Необхідність розробки портативних експрес-засобів для вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах                                   | Міжнародна науково-практична конференція «Perspectives of contemporary science: theory and practice». Львів, 16-18 вересня 2024 р.                                                                              |
| 3                                                                          | Перспективи використання інноваційних експрес-засобів вимірювання масової частки сірки в нафтопродуктах                                     | Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів». Вінниця, 17-18 жовтня 2024 р.                                                      |
| 4                                                                          | Вплив вмісту сірки в паливах на сільськогосподарські машини.                                                                                | Міжнародно науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості» Кам'янець Подільський 16 жовтня 2025 р.                                                       |
| 5                                                                          | Застосування багатолінійної регресії для визначення вмісту сірки в паливах методом інфрачервоної спектроскопії                              | Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи», м. Вінниця, 17-18 жовтня 2025 р.                                                          |
| 6                                                                          | Експрес-контроль сірковмісних сполук у паливі як елемент технічного сервісу сільськогосподарської техніки                                   | XXVI міжнародна наукова конференція "Сучасні проблеми землеробської механіки" м. Київ, 17-18 жовтня 2025 р.                                                                                                     |
| 7                                                                          | Обґрунтування необхідності та перспективи розвитку методів вимірювання шкідливих домішок у нафтопродуктах для сільськогосподарської техніки | Всеукраїнська науково-практична конференція «Міждисциплінарні інновації та науково-технологічні рішення для сталого розвитку аграрної науки, економіки, освіти та суспільства» м. Вінниця, 14-15 травня 2026 р. |
| 8                                                                          | Обґрунтування структури інтеграції датчика контролю шкідливих домішок у паливну систему тракторів                                           | I Міжнародно науково-практична інтернет-конференція «Машинобудування, агроінженерія та автомобільний транспорт: інновації і перспективи розвитку», Полтава, 21 травня 2026 р.                                   |

Аспірант

Вчений секретар



Ярослав САФТІЮК

Тетяна КОРПАНЮК

## ДОДАТОК І

## СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

Сафтюка Ярослава Владиславовича

| № п/п                                             | Назва                                                                                                                                 | Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від інших                                                                                                                                                                                                 | Кількість сторінок/ др. арк.    | Співавтори |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------|
| <b>Статті у наукових фахових виданнях України</b> |                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                 |            |
| 1                                                 | Сучасні рішення та розвиток основних методів і засобів вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах.                           | <i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.</i> 2024. Т. 341, № 5 (341). DOI: 10.31891/2307-5732-2024-341-5-69 URL: <a href="https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/4447/01">https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/4447/01</a> | <u>C. 477-484</u><br>1,5        | –          |
| 2                                                 | Intelligent systems for improving the reliability of sulfur measurement in fuels.                                                     | <i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2025. № 3. (130). DOI: 10.37128/2520-6168-2025-3-8 URL: <a href="https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/4447/01">https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/4447/01</a>                                                 | <u>C. 66-73</u><br>0,8 (0,4)    | Shtuts A.  |
| 3                                                 | Інфрачервона спектроскопія інструмент підвищення надійності інтелектуального аналізу сірковмісних сполук нафтових палив.              | <i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.</i> 2025. Т. 359 № 6.2. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-359-72 URL: <a href="https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/2316/2248">https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/2316/2248</a>    | <u>C. 17-21</u><br>0,76(0,38)   | Штуць А.А. |
| 4                                                 | Вплив шкідливих домішок в паливі на ефективність роботи двигуна внутрішнього згорання.                                                | <i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.</i> 2026. Т. 366. №4. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-367-16. URL: <a href="https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/2712/2625">https://heralds.khmmu.edu.ua/index.php/heralds/article/view/2712/2625</a>     | <u>C. 111-117</u><br>0,54       | –          |
| 5                                                 | Програма та методика експериментальних досліджень діелектричного методу експрес-контролю вмісту шкідливих домішок у дизельному паливі | <i>Вібрації у техніці та технологіях.</i> 2026. №2(121). DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-9. URL: <a href="https://vibration.nau.vsau.org/storage/articles/May2026/baZz-EjkwZVNQ11A2aLpdf">https://vibration.nau.vsau.org/storage/articles/May2026/baZz-EjkwZVNQ11A2aLpdf</a>                              | <u>C. 75-81</u><br>0,65 (32,5)  | Штуць А.А. |
| 6                                                 | Математична модель контролю забрудненості палива за діелектричною проникністю в системах живлення дизельних двигунів.                 | <i>Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.</i> 2026. Вип. 3(158). С. 114-121. DOI: 10.32782/1995-0519.2026.3.10 URL: <a href="https://visnykkrnu.kdu.edu.ua/statti/2026_3_114.pdf">https://visnykkrnu.kdu.edu.ua/statti/2026_3_114.pdf</a>                       | <u>C. 114-121</u><br>0,69(0,35) | Штуць А.А. |

| Тези і матеріали конференцій |                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                           |            |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|
| 7                            | Огляд сучасних методів визначення сірки в нафтопродуктах                                                  | <i>Проблеми, пріоритети та перспективи розвитку науки, освіти і суспільства в XXI столітті: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 15 червня 2024 року, м. Полтава, Україна. 2024.</i><br>URL : <a href="https://drive.google.com/file/d/1xfW62A1Uga8j8J5GkF046Mn0SReJkGQ/preview">https://drive.google.com/file/d/1xfW62A1Uga8j8J5GkF046Mn0SReJkGQ/preview</a>                                                                                                                                | <u>C. 55-56</u><br>0,14   | –          |
| 8                            | Необхідність розробки портативних експрес-засобів для вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах | <i>VIII Міжнародна науково-практична конференція " Perspectives of contemporary science: theory and practice": збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 16-18 вересня 2024 року. м. Львів, Україна. 2024.</i><br>URL : <a href="https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/09/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-16-18.09.2024.pdf">https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/09/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-16-18.09.2024.pdf</a> | <u>C. 206-209</u><br>0,17 | –          |
| 9                            | Експрес-контроль сірковмісних сполук у паливі як елемент технічного сервісу сільськогосподарської техніки | <i>Сучасні проблеми землеробської механіки. Збірник тез доповідей XXVI міжнародної наукової конференції. 17–18 жовтня 2025 року, присвячений 125-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. м. Київ, 2025</i> URL : <a href="https://surl.li/vubqfa">https://surl.li/vubqfa</a>                                                                                                                                                                                                                   | <u>C. 515-516</u><br>0,08 | –          |
| 10                           | Вплив вмісту сірки в паливах на сільськогосподарські машини.                                              | <i>Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості. Матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. 16 жовтня 2025 р. м. Кам'янець Подільський</i><br>URL : <a href="https://surl.li/xjchdk">https://surl.li/xjchdk</a>                                                                                                                                                                                                                                                                     | <u>C. 230-232</u><br>0,11 | Штуць А.А. |
| 11                           | Обґрунтування структури інтеграції датчика контролю шкідливих домішок у паливну систему тракторів         | <i>I Машинобудування, агроінженерія та автомобільний транспорт: інновації і перспективи розвитку. Збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. 21 травня 2026 р, Полтава.</i><br>URL : <a href="https://drive.google.com/drive/olders/1T4tvZ1B3geiF_77A5XE7ZHY8MTJqb62g">https://drive.google.com/drive/olders/1T4tvZ1B3geiF_77A5XE7ZHY8MTJqb62g</a>                                                                                                                                               | <u>C. 122-123</u><br>0,1  | –          |

| Об'єкти права інтелектуальної власності |                                                      |                                                                                                                                                       |   |                                                 |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------|
| 12                                      | Вимірювальна насадка вмісту сірки в скрапленому газі | Патент України на корисну модель № 159188 Україна. МПК G01N21/00, G01N21/01. № u202401656; заяв. від 03.04.2024 р. опубл. 07.05.2025, бюл. № 19/2025. | - | Гончарук І.В.,<br>Граняк В.Ф.,<br>Токарчук О.А. |

Усього за темою дисертаційної роботи «Обґрунтування параметрів системи моніторингу якості сумішевого палива для дизельних двигунів» опубліковано 12 наукових праць. Загальний обсяг опублікованих статей і тез становить 5,54 умов. друк. арк. (власний доробок автора – 4,04 умов. друк. арк.), у тому числі 6 статей загальним обсягом 4,94 умов. друк. арк. (власний доробок автора – 3,50 умов. друк. арк.) у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 1 патент України на корисну модель та 5 тез доповідей загальним обсягом 0,60 умов. друк. арк.

Аспірант

Вчений секретар



Ярослав САФТІЮК

Тетяна КОРПАНІЮК