

Черкаський державний технологічний університет  
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Топтун Анна Володимирівна

УДК 681.518.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ**  
**САНІТАРНОГО СТАНУ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ**

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_ А.В. Топтун

Науковий керівник:  
Бондаренко Юлія Юріївна,  
кандидат технічних наук, доцент

## АНОТАЦІЯ

**Топтун А.В. Інформаційно-вимірювальна система моніторингу санітарного стану деревних насаджень** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти та науки України, Черкаси, 2020.

Зміна клімату сьогодні є одною з найважливіших проблем в усьому світі і в Україні зокрема. Так, в грудні 2019 року на Всесвітній кліматичній конференції ООН КС25 в Чилі, обговорювалася необхідність скорочення викидів парникових газів, які призводять до ураганів, посухи та пожеж в різних країнах світу.

Зміна клімату в Україні, зокрема, спричиняє підвищення середньорічної температури, що, в свою чергу, призводить до буревіїв, шквальних вітрів та аномальної спеки влітку на території всієї країни. Наслідком цього є прискорене збільшення площ усихання та пошкодження шкідниками лісових, садово-паркових та муніципальних насаджень. В результаті чого спостерігається погіршення санітарного стану деревних насаджень, котре, в свою чергу, призводить до обвалу дерев, що останнім часом все частіше супроводжується руйнуванням громадських та житлових будівель, ліній електропередачі, транспорту, а також травмуванням та, навіть, загибеллю людей.

При цьому й досі одним з найпоширеніших методів визначення аварійного санітарного стану дерев є візуальний (державний нагляд). Такий метод дозволяє надавати висновок лише за зовнішніми ознаками та не передбачає виявлення внутрішніх пошкоджень.

В дисертаційному дослідженні вирішується важлива науково-практична задача підвищення точності та надійності визначення санітарного стану масивів деревних насаджень шляхом упровадження методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в

цілому представляє собою інформаційно-вимірювальну систему дистанційного моніторингу.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційних досліджень, їх актуальність, відповідність науковим темам; визначено наукову новизну та практичне значення результатів дисертації, а також предмет та об'єкт дослідження, сформульовано мету та задачі наукового дослідження.

*Перший розділ* роботи присвячений визначенню та аналізу факторів, що мають значущий вплив на санітарний стан деревних насаджень та усунення яких на сьогоднішній день не представляється можливим, а саме: кліматичних, біотичних та екологічних факторів. Визначено залежності впливу середньої температури за критичний період на динаміку всихання дерев, спалахи масового розмноження шкідливих комах, а також на площі лісових пожеж. Проаналізовано основні методи визначення санітарного стану деревних насаджень. Встановлено, що застосування іонометричного методу, як найперспективнішого в науковому дослідженні при контролі санітарного стану масивів деревних насаджень, обмежене відсутністю засобів автоматизації та інформатизації цього методу. Встановлені основні умови, яким мають відповідати інформаційно-вимірювальні системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Проаналізовано найбільш використовувані методи та програмно-апаратні засоби математичного моделювання поведінки і динаміки розвитку рослинних екосистем, визначені їх переваги та недоліки. Встановлено перспективу використання цих моделей для моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

Також в даному розділі окреслено обраний напрямок для дисертаційного дослідження та сформульовані основні задачі наукової роботи.

*Другий розділ* присвячений удосконаленню існуючого та розробленню нового експериментально-методичного та математичного забезпечення для проведення дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Для цього, були уточнені та вдосконалені методики визначення показників  $pH$  та солоності ґрунту та вперше застосовані з метою визначення цих показників в

зоні кореневого живлення дерева; уточнені та вдосконалені експрес-методи визначення цукру та  $pH$  та вперше застосовані для експрес-визначення якісних показників деревного соку (сахаристості, водневого показника  $pH$  та в'язкості). Методом багатофакторного планування експерименту побудовані математичні регресійні моделі, які описують залежності якісних показників деревного соку від зовнішніх кліматичних факторів та розраховано статистичні характеристики цих моделей. Складено динамічну модель, яка дозволяє високоточно (відносна похибка не перевищила 4%) визначати санітарний стан деревних насаджень і алгоритм якої (моделі) пропонується покласти в основу системи підтримки прийняття рішень інформаційно-вимірювальної системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Вперше запропоновано математичну модель, на основі якої складено алгоритм зонування деревних насаджень за категоріями їх санітарного стану, що дозволяє проведення більш точного та інформативного моніторингу стану насаджень. В результаті розробленого експериментально-методичного та математичного забезпечення складено загальний алгоритм проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень, що дозволяє проводити довгострокове прогнозування зміни санітарного стану цих насаджень і може служити основою для високоточної та ефективної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу.

*Третій розділ* присвячений розробці метрологічно-інструментального та програмно-апаратного забезпечення, що лягло в основу створення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Вперше запропоновано конструкцію та технологічну послідовність виготовлення мікросенсору для визначення якісних показників деревного соку (кислотність, сахаристість та в'язкість), яка відповідає основним вимогам надійності, дешевизни, простоти та не веде до фізичного пошкодження дерев. Також визначено вимоги до конструкції інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень; складено структурну та функціональну схеми, на основі яких створено модельний зразок такої інформаційно-вимірювальної системи, а також розроблено програмне

забезпечення для автоматизації процесу моніторингу, що дозволило зменшити вплив оператора на процес моніторингу та реалізувати віддалений моніторинг та прогнозування санітарного стану деревних насаджень. Доведено, що розроблені в розділі метрологічно-інструментальна та програмно-апаратна бази сприяють покращенню ефективності (підвищення точності та надійності) процесу моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

*В четвертому розділі* наводяться результати експериментального випробовування розробленої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу та здійснюється порівняння цих результатів з даними математичного моделювання та результатами, отриманими альтернативними методами дослідження (наприклад, методом візуального спостереження). Представлені наочні результати моніторингу досліджуваної ділянки (на прикладі парку «Спортивний», м. Черкаси) та наведено результати зонування дерев за категоріями санітарного стану, здійснені на основі отриманих результатів моніторингу.

Приведено результати розрахунку точності, надійності (вірогідності отримання коректних даних приладом управління) та швидкодії передачі/прийому інформації з вимірювальних датчиків приладом управління для різних досліджуваних ділянок. Отримані графіки залежності цих параметрів від зміни положення оператора з пристроєм управління відносно датчиків, а також від терміну експлуатації вимірювальних датчиків та щільності деревних насаджень.

Також у розділі наводяться результати впровадження досліджень та розробленої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень у навчальний процес та їх застосування в лісовому господарстві.

Одержані результати моніторингу використані для дистанційного превентивного визначення санітарного стану деревних насаджень лісових та садово-паркових зон, а також дозволяють спрогнозувати отруєння та зараження

таких насаджень для своєчасного проведення санітарних та профілактичних заходів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, нейромережева модель інформаційно-вимірювальної системи моніторингу, а також розроблене методичне, математичне, метрологічно-інструментальне та апаратно-програмне забезпечення знайшли практичну апробацію у лісових господарствах Черкаської області.

Основні положення дисертації впроваджено у навчальний процес кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету з дисциплін «Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин», «Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів», «Інтелектуальні технології вимірювання», «Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи».

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальна система, нейромережева модель, регресійна модель, моніторинг, санітарний стан, деревні насадження, кліматичні фактори, ефективність.

## SUMMARY

***Toptun A.V.* – Information and measuring system for monitoring the sanitary condition of trees plants – Manuscript.**

The thesis is submitted to obtain a scientific degree of Doctor of Philosophy, specialty 152 – Metrology and information-measuring technique – Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2020.

Climate change is one of the most important issues in the world and in Ukraine today. In December 2019 the World Climate Conference of the United Nations in Chile KC25 discussed the need to reduce greenhouse gas emissions, which lead to hurricanes, droughts and fires in different countries.

Climate change in Ukraine, contributes to an increase in the average annual temperature, which leads to storms, gusts of wind and abnormal summer heat throughout the country. The consequence of this is an accelerated increase in the area of drying and pest damage of forest, garden and municipal plants. Deterioration of the sanitary condition of tree plants leads not only to tree collapse and protection. The collapse can lead to the destruction of public and residential buildings, power lines, transport, as well as injuries and even deaths.

However, the most common method of determining the emergency sanitary condition of trees is visual (state supervision). This method gives an opinion only on external signs, which do not include the presence of internal damage.

The dissertation research solves an important scientific and practical problem of increasing the efficiency of determining the sanitary condition of arrays of trees by introducing methodological, mathematical, metrological-instrumental and hardware-software, which in general is an information-measuring system of remote monitoring.

*The introduction* provides a general description of dissertation research, their relevance, relevance to scientific topics; the scientific novelty and practical significance of the dissertation results are determined, as well as the subject and object of the research, the purpose and tasks of the scientific research are formulated.

The first section of the work is devoted to the identification and analysis of factors that have a significant impact on the sanitary condition of tree plantations and the elimination of which is currently not possible, namely: climatic, biotic and environmental factors. The dependences of the influence of the average temperature for the critical period on the dynamics of tree drying, outbreaks of mass reproduction of harmful insects, as well as on the area of forest fires are determined. The main methods of determining the sanitary condition of tree plants are analyzed. It is established that the application of the ionometric method, as the most promising in scientific research in the control of the sanitary condition of arrays of tree plantations, is limited by the lack of means of automation and informatization of this method. The main conditions to be met by the information and measurement systems for monitoring the sanitary condition of tree plants have been established. The most used methods and software and hardware of mathematical modeling of behavior and dynamics of development of plant ecosystems are analyzed, their advantages and disadvantages are defined. The prospect of using these models to monitor the sanitary condition of tree plants is established.

Also in this section the chosen direction for dissertation research is outlined and the main tasks of scientific work are formulated

The second section is devoted to the improvement of the existing and development of new experimental-methodical and mathematical support for remote monitoring of the sanitary condition of tree plants. To this end, the methods for determining the pH and salinity of the soil were refined and improved and used for the first time to determine these indicators in the area of root nutrition of the tree; refined and improved rapid methods for determining sugar and pH and first used for rapid determination of quality indicators of wood sap (sugar content, hydrogen pH and viscosity). Mathematical regression models are constructed by the method of multifactor planning of the experiment, which describe the dependences of quality indicators of wood sap on external climatic factors and the statistical characteristics of these models are calculated. A dynamic model has been developed that allows to accurately (relative error did not exceed 4%) determine the sanitary condition of tree



plants and the algorithm of which (model) is proposed to form the basis of decision support information and measurement system for remote monitoring of sanitary condition of tree plants. For the first time, a mathematical model was proposed, on the basis of which an algorithm for zoning tree plants by categories of their sanitary condition was developed, which allows for more accurate and informative monitoring of tree plants condition. As a result of the developed experimental-methodical and mathematical support the general algorithm of monitoring of a sanitary condition of tree plants is made that allows to carry out long-term forecasting of change of a sanitary condition of these plantations and can serve as a basis for highly exact and effective information and measuring monitoring system.

*The third section* is devoted to the development of metrological-instrumental and software-hardware, which formed the basis for the creation of information and measurement system for monitoring the sanitary condition of tree plants. For the first time, the design and technological sequence of manufacturing a microsensor for determining the quality of tree's sap (acidity, sugar content and viscosity), which meets the basic requirements of reliability, cheapness, simplicity and does not lead to physical damage to trees. Also the requirements to the design of the information-measuring system of monitoring the sanitary condition of tree plantations are determined; structural and functional schemes were compiled, on the basis of which a model of such information-measuring system was created, and software for automation of the monitoring process was developed, which allowed to reduce the operator's influence on the monitoring process and implement remote monitoring and forecasting of sanitary condition of tree plants. It is proved that the metrological-instrumental and software-hardware base developed in the section leads to the improvement of efficiency (increase of accuracy and reliability) of the process of monitoring the sanitary condition of tree plants.

*The fourth section* presents the results of experimental testing of the developed information and measurement monitoring system and compares these results with mathematical modeling data and the results obtained by alternative research methods (for example, the method of visual observation). Visual results of

monitoring of the studied area are presented (on the example of Sportivny Park, Cherkasy) and the results of tree zoning by categories of sanitary condition, carried out on the basis of the obtained monitoring results, are given.

The results of calculation of accuracy, reliability (probability of receiving correct data by the control device) and speed of transmission / reception of information from measuring sensors by the control device for various investigated sites are given. Graphs of dependence of these parameters on change of position of the operator with the control device concerning sensors, and also on service life of measuring sensors and density of tree plants are received.

The section also presents the results of the implementation of research and the developed information and measurement system for monitoring the sanitary condition of tree plants in the educational process and their application in forestry.

The obtained monitoring results were used for remote preventive determination of the sanitary condition of tree plants of forestries and garden and park zones, and also allow to predict poisoning and contamination of such plantations for timely sanitary and preventive measures.

The results of theoretical and experimental research, neural network models of information-measuring monitoring system, as well as the developed methodological, mathematical, metrological-instrumental and hardware-software have found practical testing in the forests of Cherkasy region.

The main provisions of the dissertation are introduced into the educational process of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies of Cherkasy State Technological University in the disciplines "Methods of improving the metrological characteristics of control devices and determining the composition of substances", "Technical means for studying the influence of climatic factors", "Intelligent measurement technologies", "Automated information and measuring systems".

**Key words:** information-measuring system, neural network model, regression model, monitoring, sanitary condition, tree plants, climatic factors, efficiency.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань  
України*

1. *А. Топтун, та Ю. Бондаренко, “Розробка комплексного методу визначення санітарного стану деревних насаджень”, Вісник Черкаського державного технологічного університету. Автоматизація і приладобудування. №2, с.5-13.2020.*

*Здобувачем розроблено комплексний метод визначення санітарного стану  
деревних насаджень*

2. *А. Топтун, та Ю.Бондаренко, “Зонування деревних насаджень за показаннями датчиків для дистанційного вимірювання якісних характеристик ґрунту”, Вісник Київського політехнічного інституту. Сер. Приладобудування. – 2020. – Вип. 59 (1). – С. 57-62.*

*Здобувачем розроблено модель для проведення зонування досліджуваної ділянки за категоріями санітарного стану*

*Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до  
Європейського Союзу*

3. *A. Topun, and Yu. Bondarenko, “Negative factors affecting the sanitary status of tree plants and effective approaches to their research”, Mechanization in agriculture & Conserving of the resources. no 1. pp. 42-45, 2020.*

*Здобувачем проведено аналіз негативних факторів, які можуть впливати на санітарний стан деревних насаджень та здійснено порівняльний аналіз методів для визначення стану дерев*

4. *A. Topun, and Yu. Bondarenko, “Information-measuring system for monitoring the sanitary condition of tree stands”, International scientific journal "Industry 4.0". no 3. pp. 142-147, 2020.*

*Здобувачем розроблено інформаційно-вимірвальну систему моніторингу санітарного стану деревних насаджень*

*Матеріали й тези конференції*

5. *А. Топтун, та Ю.Бондаренко, “Огляд методів пошуку дефектів в зелених насадженнях”, в I Всеукраїн. наук.-практ. конф. «Наука України – погляд молодих вчених крізь призму сучасності», Черкаси, 2017.*

*Здобувачем проведено огляд методів для пошуку дефектів в зелених насадженнях*

## ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ .....	17
ВСТУП .....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ САНІТАРНОГО СТАНУ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ .....	25
1.1. Негативні фактори, що впливають на санітарний стан дерев та якість деревини .....	26
1.2. Методи та засоби визначення та контролю санітарного стану деревних насаджень .....	34
1.3. Сучасні системи моніторингу та аналізу в садово-парковому та лісовому господарстві .....	41
1.4. Математичні моделі впливу негативних факторів на санітарний стан деревних насаджень .....	46
1.5. Узагальнення результатів аналізу. Обґрунтування напрямків досліджень .....	49
1.6. Висновки до розділу 1 .....	50
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ НЕГАТИВНИХ ФАКТОРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА САНІТАРНИЙ СТАН ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ .....	51
2.1. Обґрунтування вибору об'єктів та засобів проведення досліджень .....	52
2.2. Методи проведення та оброблення результатів експеримен- тальних досліджень .....	56
2.2.1. Розроблення та апробація методик експериментальних досліджень .....	57
2.2.1.1. Визначення показників рН та солоності ґрунту в зоні кореневого живлення дерева .....	57

2.2.1.2. Дослідження впливу зміни кислотності та солоності ґрунтів на санітарний стан дерева .....	60
2.2.1.3. Експрес-визначення якісних показників деревного соку .....	62
2.2.2. Розроблення та випробовування розрахункових методів та методик оброблення результатів експерименту .....	65
2.2.2.1. Встановлення впливу негативних факторів оточуючого середовища на санітарний стан дерева методом планування багатофакторного експерименту .....	65
2.2.2.2. Встановлення закономірностей впливу негативних факторів оточуючого середовища на якісні показники деревного соку... ..	70
2.2.2.3. Визначення санітарного стану деревних насаджень методом нечіткої логіки .....	75
2.2.2.4. Прогнозування терміну життєвого циклу дерева від зміни якісних показників деревного соку .....	79
2.3. Розробка математичної моделі зонування деревних насаджень за санітарним станом на основі даних моніторингу .....	85
2.4. Алгоритм проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	90
2.5. Висновки до розділу 2 .....	92
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ САНІТАРНОГО СТАНУ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ .....</b>	<b>95</b>
3.1. Технологічні основи виготовлення мікросенсорів для визначення якісних показників деревного соку .....	96
3.2. Проектування архітектури інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	100
3.3. Програмне забезпечення системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	114

3.4. Похибки визначення параметрів автоматизованого моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	121
3.5. Висновки до розділу 3 .....	
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБОВУВАНЬ ТА ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ .....</b>	<b>122</b>
4.1. Експериментальне випробування інформаційно-вимірюваль- ної системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень в умовах .....	123
4.2. Порівняння результатів експериментальних випробувань з даними статистичних досліджень .....	126
4.3. Дослідження ефективності (точності, надійності та швидкодії) розробленої інформаційно-вимірювальної системи для дистанційного моніторингу санітарного стану масивів деревних насаджень .....	129
4.4. Рекомендації щодо застосування розробленої інформаційно- вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	133
4.5. Висновки до розділу 4 .....	134
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>135</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>138</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>153</b>
Додаток А. Категорії санітарного стану деревних насаджень .....	154
Додаток Б. Математичні регресійні моделі, які описують залежності критеріїв оптимізації від зовнішніх кліматичних факторів ...	158
Додаток В. Динамічна модель, що використовує механізм нечіткого виведення за Мамдані та центроїдний метод дефазифікації.....	161
Додаток Г. Програма для прогнозування строку життєвого циклу дерева від зміни якісних показників деревного соку (MathLAB) .....	162
Додаток Д. Розрахунок математичної моделі зонування досліджуваної ділянки деревних насаджень за санітарним станом .....	166

Додаток Е. Блок-схема програми управління ІВС дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	172
Додаток Є. Визначення похибок моніторингу санітарного стану деревних насаджень .....	1174
Додаток Ж. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	181
Додаток З. Список опублікованих праць за темою дисертації .....	183



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

HRM - Human Resources Management – системи (програми) для управління людськими ресурсами,

БД – база даних,

ГІС – геоінформаційні системи,

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі,

ДН – деревні насадження,

ІВС – інформаційно-вимірювальна система,

ММ – математична модель,

ООП – об’єктно-орієнтоване програмування,

ПЗ – програмне забезпечення,

СС – санітарний стан,

$pH$  – водневий показник, показник кислотності,

$t$  – критерій Стьюдента,

$X_{gr}$  – граничне значення вимірюваної характеристики, виходячи за яке отримане значення перевищить допустиму похибку,

$X_{випр}$  – вимірювана характеристика, отримана внаслідок еталонного випробування,

$X_{екс}$  – вимірювана характеристика, отримана внаслідок експлуатації,

$D$  – дисперсія,

$\delta_{вип i}$  – значення відносної випадкової похибки при  $i$ -му вимірюванні,

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Однією з найважливіших проблем сьогодення є різка зміна клімату, як в Україні, так і у всьому світі. Так, на Всесвітній кліматичній конференції ООН КС25 (грудень 2019 року, м. Сантьяго, Чилі) йшлося про необхідність скорочення викидів парникових газів. Проте, основні промислові країни-забруднювачі (США, Китай, Індія, Росія, та інші) не бажають поступатися своїми економічними та промисловими амбіціями. Результати цього видно вже сьогодні: постійні повені на Близькому сході, Європі та Індії; буревії по всій Європі; урагани в Америці; посухи в Західній та Південній Європі; пожежі – як в Південній та Центральній Америці, так і в Австралії, Сибіру тощо.

Зміна клімату не оминула й Україну. Підняття середньорічної температури; аномальна спека влітку, буревії та шквальні вітри спостерігаються на всій території України. Це призводить до прискореного усихання та пошкодження як окремих дерев, так і цілих лісових, садово-паркових масивів, а також муніципальних зон насаджень. Як наслідок, руйнація та падіння дерев, що веде не лише до захаращення цих зон, але й до пошкодження приватної та комунальної власності, а у деяких випадках – до травмування та загибелі людей.

При цьому найбільш поширеним методом визначення незадовільного санітарного стану як окремих дерев, так і масивів деревних насаджень на сьогодні є їх візуальний огляд. Цей метод, нажаль, не дозволяє виявити дерева, що мають внутрішні пошкодження, проте за візуальними ознаками задовольняють належному санітарному стану. Що, в свою чергу, не дозволяє застосовувати до таких дерев превентивні заходи щодо їх своєчасної санітарної вирубки.

Проблематикою визначення внутрішніх дефектів та пошкоджень окремих дерев, а також моніторингом впливу негативних факторів оточуючого середовища на санітарний стан деревних насаджень займається

багато організацій та наукових шкіл, що відображено у наукових працях таких вчених як: Алексеева В.А., Бовсуновський В.О., Браткова К.Ю., Зібцева О.В., Левон Ф.М., Рябчевський О.В., Тарабрин В.П. Ялова К.М. та інших.

Проте, основні питання, які вирішувалися цими та іншими вченими, про що можна судити з відкритих літературних джерел та джерел Internet, обмежувалися індивідуальним обстеженням дерев спеціалістами із застосуванням візуальних методів та засобів оптичного або акустичного принципу дії.

В той же час, використання сучасних пристроїв та програмно-інформаційних засобів дистанційного моніторингу (безпілотних літальних апаратів з приладами візуального експрес-аналізу, даних геопорталів, супутникових знімків та метеорологічних веб-сервісів тощо) не дозволяє повною мірою визначати стан окремих дерев, а тим більше здійснити розподіл деревних насаджень за їх санітарним станом.

Отже, розробка інформаційно-вимірювальної системи, що за рахунок застосування сучасних технологічних та програмно-технічних засобів дозволить здійснювати дистанційний моніторинг санітарного стану деревних насаджень шляхом врахування змін якісних показників деревного соку та забезпечить можливість зонування насаджень за показниками вимірювальних мікродатчиків, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами.** Тема дисертаційної роботи відповідає основним цілям сталого розвитку, затвердженим у 2015 році на саміті ООН на період 2016-2030. Зокрема: «Вжиття невідкладних заходів щодо боротьби зі зміною клімату та його наслідками», «Захист та відновлення екосистем суші та сприяння їх раціональному використанню, раціональне лісокористування, боротьба з опустелюванням, припинення і повернення назад (розвертання) процесу деградації земель та зупинка процесу втрати біорізноманіття». А також базується на Принципах лісівництва, прийнятих Конференцією ООН з

навколишнього середовища і розвитку 14 червня 1992 р. та Принципах моніторингу (у межах національної компетенції), що орієнтуються на Лісову стратегію 2015 року, а також відповідають низці євродиректив за напрямками лісокористування, зокрема Міжнародній Спільній (Україна – ЄС) Програмі оцінки та моніторингу впливу забруднення повітря на ліси в регіоні Європейської Економічної Комісії ООН (*ICP Forests*).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – підвищення точності та надійності моніторингу санітарного стану деревних насаджень шляхом оперативного визначення категорій санітарного стану як окремих дерев, так і їх масивів за рахунок упровадження дистанційної моніторингової системи, що складається з системи датчиків і дистанційно розташованої системи прийому, аналізу та обробки інформації та дозволяє за зміною факторів зовнішнього середовища, що впливають на основні показники деревного соку, здійснити розподіл деревних насаджень за їх санітарним станом.

*Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:*

- провести аналіз існуючих методів та засобів вимірювання характеристик санітарного стану деревних насаджень, як складової частини інформаційно-вимірювальної технології моніторингу, виявити їх недоліки та обґрунтувати шляхи підвищення точності, надійності та швидкості визначення категорії санітарного стану таких насаджень;
- підвищити адекватність та оперативність оцінювання санітарного стану деревних насаджень шляхом розробки нового методу визначення факторів зовнішнього середовища, що впливають на цей стан;
- розробити математичну модель залежності основних показників деревного соку від факторів зовнішнього середовища для визначення категорій санітарного стану дерев;
- розробити новий метод та первинний вимірювальний перетворювач інформаційно-вимірювальної системи моніторингу для точного і надійного визначення основних показників деревного соку;

– експериментально апробувати розроблену інформаційно-вимірвальну систему для дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

**Об'єкт дослідження** – процес моніторингу факторів зовнішнього середовища, що впливають на санітарний стан деревних насаджень.

**Предмет дослідження** – моделі та метод визначення санітарного стану деревних насаджень.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач використовувалися сучасні аналітичні методи фізико-хімічного аналізу; окремі положення теорії руху соку та споживних речовин в деревині (cohesion-tension theory), а також методи штучних нейронних мереж та математичної статистики для обробки експериментальних даних.

***Наукова новизна одержаних результатів.***

– вперше створено метод автоматизованого визначення санітарного стану дерев, який полягає у контактному вимірюванні основних показників деревного соку та враховує вплив факторів зовнішнього середовища на ці показники і, на відміну від існуючих, застосовує дистанційне опитування кількох давачів та результати обробки кількох аналітичних сигналів, що підвищує адекватність та оперативність оцінювання санітарного стану деревних насаджень;

– вперше розроблена математична модель залежності основних показників деревного соку від факторів зовнішнього середовища, яка представляє собою систему рівнянь регресії, і, на відміну від існуючих, використовує масив чисельних показників факторів підвищеної інформативності, що дозволяє забезпечити прийнятну адекватність класифікації санітарного стану дерев та автоматизувати процес визначення категорій їх санітарного стану;

– вперше для формування набору правил класифікування дерев за санітарним станом в системі моніторингу використана математична модель, яка представляє собою поєднання нейромережі та сукупності регресійних

рівнянь і, на відміну від існуючих, використовує алгоритм Мандамі та центроїдний метод дефазифікації, що забезпечує здатність визначити граничні значення факторів для цих правил, вихід за межі яких погіршує санітарний стан деревних насаджень;

- вперше розроблена прогнозна модель зміни санітарного стану деревних насаджень, яка являє собою регресійну залежність, що відображає закономірність зміни санітарного стану дерев у минулому та використовує цю закономірність для оцінки їх стану у майбутньому, і, на відміну від існуючих, використовує комплексний підхід до процесу зонування із застосуванням нейромережевого моделювання та експертного оцінювання його результатів, що дозволяє підвищити точність прогнозування та збільшити прогнозний період.

***Практичне значення одержаних результатів.*** В дисертаційному дослідженні вирішується важлива науково-практична задача підвищення точності та надійності визначення санітарного стану масивів деревних насаджень шляхом упровадження методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в цілому представляє собою інформаційно-вимірювальну систему дистанційного моніторингу.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено комплекс методик для визначення впливу факторів зовнішнього середовища на санітарний стан деревних насаджень;
- розроблено та програмно реалізовано алгоритм визначення санітарного стану деревних насаджень, що дозволяє враховувати зміну основних показників деревного соку в залежності від факторів зовнішнього середовища, в реальному часі отримувати розподіл деревних насаджень за категоріями на основі даних моніторингу їх санітарного стану, а також дозволяє прогнозувати життєвий цикл деревних насаджень;
- запропоновано технологію виготовлення мікросенсорів, що вводяться в стовбур контрольного дерева та створюють сприятливі умови до його

самозаживлення, а також отримано та апробовано модельні зразки таких сенсорів для високоточного і надійного визначення основних показників деревного соку (показника рН, цукровості, в'язкості);

- на основі запропонованих технологічних рішень, технічного та програмного забезпечення для автоматизації процесу вимірювання з урахуванням біохімічного впливу провідних тканин дерева розроблено новий алгоритм реалізації моніторингу санітарного стану деревних насаджень, що підвищує ефективність проведення моніторингу.

Одержані результати моніторингу використані для дистанційного превентивного визначення санітарного стану деревних насаджень лісових та садово-паркових зон, а також дозволяють спрогнозувати отруєння та зараження таких насаджень для забезпечення своєчасного проведення санітарних та профілактичних заходів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, нейромережева модель інформаційно-вимірювальної системи моніторингу, а також розроблене методичне, математичне, метрологічно-інструментальне та апаратно-програмне забезпечення знайшли практичну апробацію у лісових господарствах Черкаської області.

Основні положення дисертації використані в навчальних курсах кафедри ПМКТ Черкаського державного технологічного університету з дисциплін: «Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин», «Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів», «Інтелектуальні технології вимірювання», «Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи».

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

- обґрунтовано доцільність застосування приведених методів

проведення та обробки результатів теоретичних та експериментальних досліджень [1, 5];

– отримані фізичні закономірності впливу факторів зовнішнього середовища на санітарний стан деревних насаджень [2];

– розроблено методичне, математичне, інструментальне та апаратно-програмне забезпечення для проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень [3];

– запропоновано інформаційно-вимірювальну систему моніторингу санітарного стану деревних насаджень [4].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень доповідалися на наукових конференціях: I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Наука України – погляд молодих вчених крізь призму сучасності», (Черкаси, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій пам'яті професора В.М. Шарапова «Датчики, прилади та системи» (Черкаси, 2017, 2018 рр.); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобування: стан і перспективи» (Київ, 2018 р.), V International Scientific Conference «High Technologies. Business. Society» (Borovets, Bulgaria, 2020), VI International Scientific Congress «Innovations» (Varna, Bulgaria, 2020).

**Публікації результатів дисертації.** Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 5 наукових працях, у тому числі 4 статтях у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у періодичних виданнях іноземних держав, 2 - у рекомендованих фахових виданнях України) та 1 тезі доповіді в збірнику матеріалів конференції.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 183 сторінки, з них обсяг основного тексту – 137 сторінок, 46 рисунків, 26 таблиць, список використаних джерел складає 123 найменувань і займає 15 сторінок, а також 9 додатків на 31 сторінці.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ САНІТАРНОГО СТАНУ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ

Серед факторів, що мають найбільш негативний вплив на санітарний стан (СС) деревних насаджень та усунення яких на сьогодні не є можливим, слід виділити наступні: кліматичні, біотичні та екологічні фактори [1 – 7]. Серед кліматичних факторів найбільш вивченим і дослідженим на сьогодні фактором є температура. В результаті аналізу наукових публікацій за цією тематикою було встановлено, що найсуттєвіше збільшення середньомісячної температури щорічно спостерігається в період травень-вересень (критичний період) [8 – 12]. Зокрема, результати досліджень впливу середньої температури за критичний період на динаміку всихання дерев, спалахи масового розмноження шкідливих комах, а також на ймовірність виникнення та площу лісових пожеж наведені в [13 – 27].

В ході аналізу основних методів визначення СС деревних насаджень [28 – 51], як найбільш перспективний метод контролю стану дерева був визначений іонометричний метод [51]. В той же час встановлено, що застосування даного методу в наукових дослідженнях для контролю санітарного стану масивів деревних насаджень обмежене, в зв'язку з відсутністю засобів автоматизації та інформатизації цього методу [51].

Встановлені основні умови, яким мають відповідати інформаційно-вимірювальні системи моніторингу СС деревних насаджень [52 – 64].

Проаналізовані найбільш використовувані методи та програмно-апаратні засоби математичного моделювання поведінки та динаміки розвитку різних екосистем, визначені їхні переваги та недоліки, а також встановлена перспектива використання цих моделей для моніторингу СС деревних насаджень [65 – 76]. В якості найбільш перспективних для подальшого удосконалення в межах даної наукової роботи обрано моделі, що

прогнозують поширення пожеж, а також осередків шкідливих комах в соснових лісах [91,93].

### 1.1 Негативні фактори, що впливають на санітарний стан дерев та якість деревини

Останнім часом спостерігається стійка негативна тенденція до часткового або повного всихання частини дерев у лісових, садово-паркових та муніципальних зонах насаджень. Причиною цього явища є зимове травмування, надлишок або, навпаки, нестача вологи, механічні пошкодження, хвороби, а також пошкодження шкідниками [1]. Ці процеси зумовлюють необхідність проведення детального аналізу причин та факторів, що впливають на стан деревних насаджень. Усі такі фактори можна умовно класифікувати наступним чином, табл.1.1 [2].

Табл.1.1. Класифікація факторів, що впливають на стан деревних насаджень

<u>Абіотичні</u> фактори неорганічної природи	<u>Біотичні</u> фактори, які є наслідком взаємодії рослин і тварин	<u>Антропогенні</u> фактори впливу діяльності людини
<u>Кліматичні, атмосферні</u> - газовий склад атмосфери, - вологість та температура повітря, - кількість опадів, - світло, - вітер та інші	<u>Рослинні</u> результат взаємодії дерев між собою, або ценотичний фактор	<u>Лісівничі</u> - рубка деревних насаджень, - випас худоби, - підсочка та ін.
<u>Едафічні</u> - вологість ґрунту, - кислотність та концентрація ґрунтового розчину, - наявність токсичних речовин в ґрунті, - властивості ґрунту (аерація, теплообмін, механічний склад), - характеристики шару ґрунту доступного для коренів та інші	<u>Зоологічні</u> результат взаємодії світу тварин та їх вплив на деревні насадження	<u>Промислові</u> - спорудження водосховищ, - атмосферне забруднення шкідливими речовинами, - меліоративні заходи
<u>Геологічні</u> - склад поверхневого шару ґрунту, - потужність повенів та інші		<u>Рекреаційні</u> - ущільнення лісу, - пожежі

У свою чергу, серед негативних факторів, що мають найбільш значний вплив, можна виділити такі [3 – 6]: негативний вплив шкідників; вплив хвороб лісу; несприятливі кліматичні умови; лісові пожежі; інші причини, які включають в себе пошкодження дикими тваринами, антропогенні фактори та надмірну вологість.

Так, в праці [7] наводиться інформація про площі пошкодження лісових насаджень за 2015 – 2018 роки в залежності від причини пошкоджень, яка наводиться у табл.1.2 та представлена на гістограмі, рис.1.1 [8].

Табл.1.2. Кількісні показники пошкодження лісових насаджень (га) в залежності від причини (виду) їх пошкоджень за роками

Вид пошкодження	2015	2016	2017	2018
- від дії шкідливих комах	1183	2332	5439	8762
- від хвороб лісу	7258	5921	2334	2464
- від впливу несприятливих погодних умов	8350	8042	3065	2605
- від лісових пожеж	8564	1591	8763	1085
- від інших причин	2413	1519	510	1532

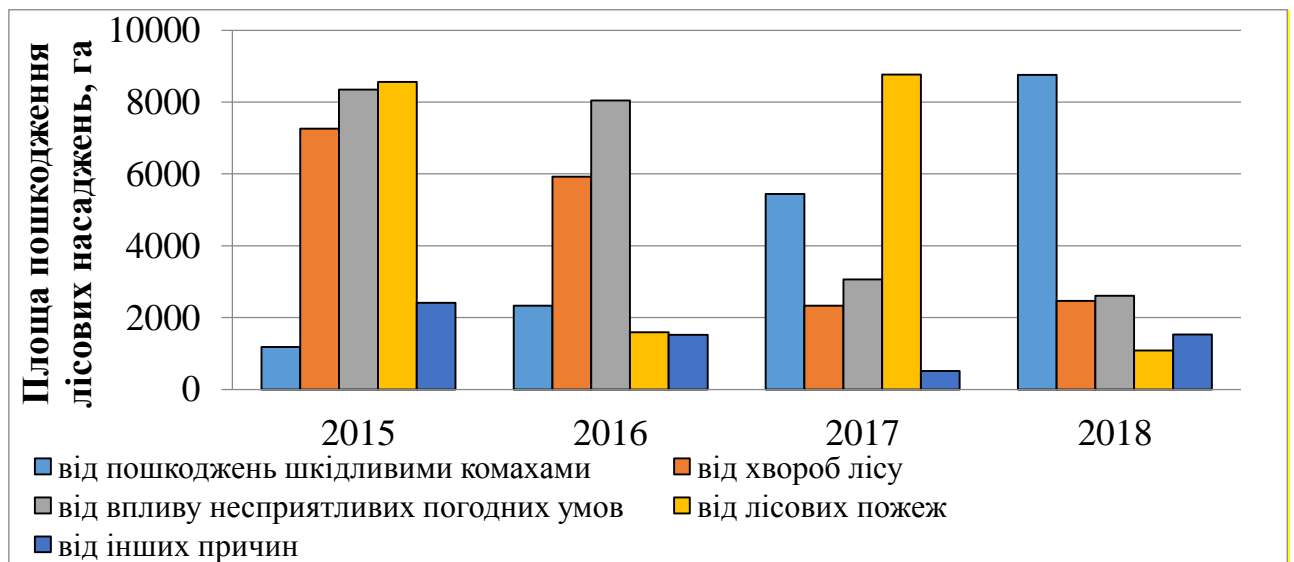


Рис.1.1. Гістограма пошкодження лісових насаджень в залежності від причини пошкоджень в Україні за 2015 – 2018 роки

На представлений гістограмі (рис.1.1) показана негативна динаміка збільшення площі пошкодження деревних насаджень від дії шкідливих комах. Ступінь впливу інших негативних факторів на санітарний стан

деревних насаджень дещо спадає за останні роки, проте все ж залишається на достатньо високому рівні.

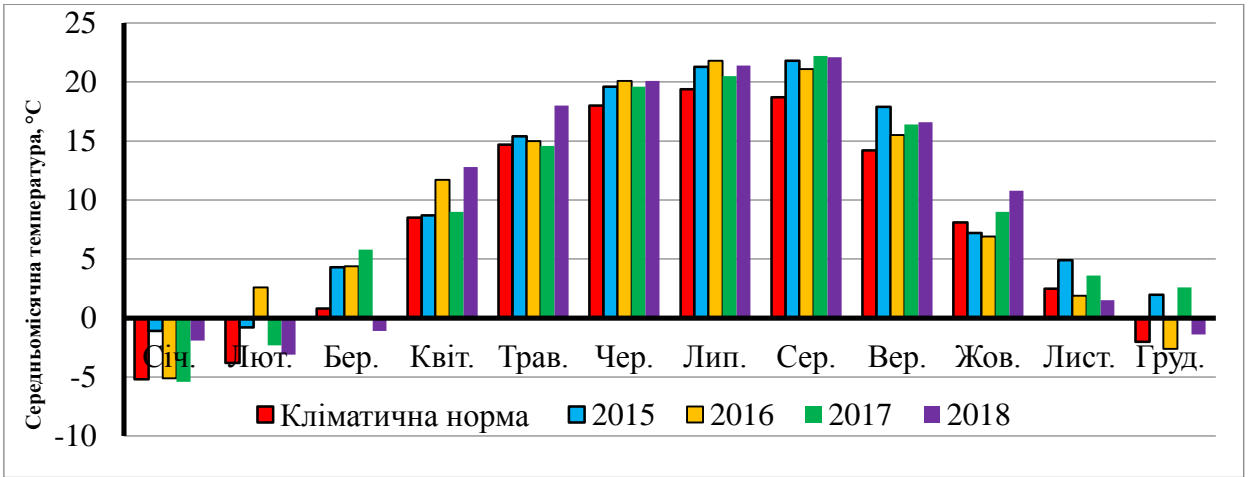
Така тенденція в останні роки може бути пов'язана з кліматичними факторами. Так, за даними Центральної геофізичної обсерваторії, в останні роки спостерігається підвищення середньомісячної температури (табл.1.3, рис.1.2) [8 – 12].

Табл.1.3. Середньомісячна температура в Україні за 2015 – 2018 роки

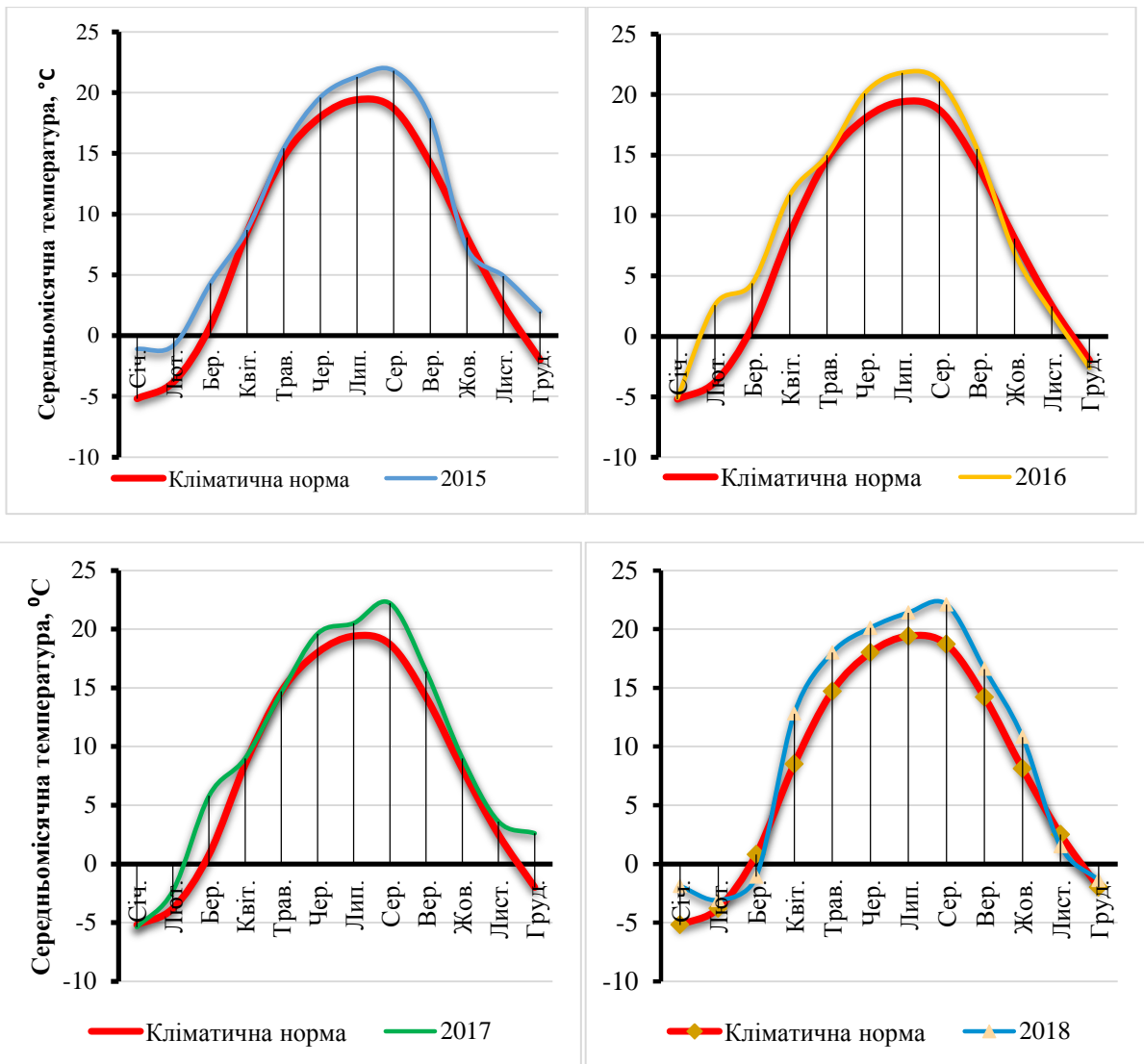
Місяць	Кліматична норма, °С	Середньомісячна температура за роками, °С			
		2015	2016	2017	2018
Січень	-5,2	-1,1	-5,1	-5,4	-1,9
Лютий	-3,8	-0,8	2,6	-2,3	-3,1
Березень	0,8	4,3	4,4	5,8	-1,1
Квітень	8,5	8,7	11,7	9	12,8
Травень	14,7	15,4	15	14,6	18
Червень	18	19,6	20,1	19,6	20,1
Липень	19,4	21,3	21,8	20,5	21,4
Серпень	18,7	21,8	21,1	22,2	22,1
Вересень	14,2	17,9	15,5	16,4	16,6
Жовтень	8,1	7,2	6,9	9	10,8
Листопад	2,5	4,9	1,9	3,6	1,5
Грудень	-2	-2	-2,6	2,6	-1,4

Графіки відхилення фактичної середньомісячної температури від кліматичної норми за 2015 – 2018 роки показують її зростання [8-12]:

1. Графік за 2015 рік відображає збільшення температури за періоди березень, червень – серпень; також суттєве підвищення середньомісячного значення температури повітря зафіксоване в лютому та грудні.
2. Графік за 2016 рік відображає збільшення температури за періоди лютий – квітень та червень – серпень.
3. Графік за 2017 рік відображає збільшення температури за періоди лютий – березень, червень – серпень; також суттєве підвищення середньомісячного значення температури повітря зафіксоване в грудні.
4. Графік за 2018 рік відображає збільшення температури за період квітень – жовтень.



а)



б)

Рис. 1.2. Гістограма статистичного розподілу середньомісячної температури за 2015 – 2018 роки (°C) (а); графіки відхилення фактичної середньомісячної температури за 2015 – 2018 роки від кліматичної норми (°C) (б)

Слід зауважити, що офіційні річні статистичні дані метеорологічної служби та лісгоспів наводяться ближче до кінця першого кварталу наступного за звітним роком. Тому, усі статистичні дані, що наводяться в дисертаційній роботі обмежуються даними за 2018 рік.

Аналізуючи вище представлені факти можна зробити висновок, що, як мінімум, за останні п'ять років спостерігається щорічне підвищення температури повітря в період травень – вересень (табл. 1.4). Це веде до ризику збільшення кількості випадків лісових пожеж, а також є основною причиною спалахів масового розмноження шкідливих комах.

Табл.1.4. Температурні характеристики в критичний період за 2015 – 2018 роки

Характеристики	Кліматична норма	2015	2016	2017	2018
Середнє значення температури в критичний період, °С	17	19,2	18,7	18,66	19,64
Відхилення фактичної температури від кліматичної норми: - абсолютне значення, °С	—	2,2	1,7	1,66	2,64
- відносне значення, %	—	12,94	10,00	9,76	15,53

В той же час, різке зниження температури оточуючого середовища в зимовий період веде до утворення морозобійних тріщин. Такі тріщини, що утворюються вздовж, поперек, а інколи мають променевидне проходження в стволі дерева, ведуть до його пошкодження та подальшої загибелі. Особливо чутливими до такого впливу є дерева таких порід, як: каштан, дуб, в'яз, горіх, ясен.

При цьому, екстремальний вплив низьких температур веде до:

- вимерзання деревних насаджень (періодична зміна замерзання на відтаювання);
- утворення тріщин в стовбурах та гілках.

А під дією високих температур спостерігаються:

- опалення кореневої шийки;

- термічний опік листя та кори стовбура (виникають в результаті прямого впливу сонячного опромінення);
- всихання деревних насаджень (збільшення інтенсивності випаровування (транспірації) води в зелених покриттях дерев під час посух внаслідок екстремальної втрати вологи в повітрі; пошкодження шкідливими комахами).

Таким чином, довготривалий вплив екстремальних температур чинить негативний вплив на СС деревних насаджень [13 – 15].

Загалом, збільшення площ пошкоджених деревних насаджень, внаслідок їх всихання, на території всієї України за період 2015 – 2018 роки представлено на рис. 1.3 [16 – 19].

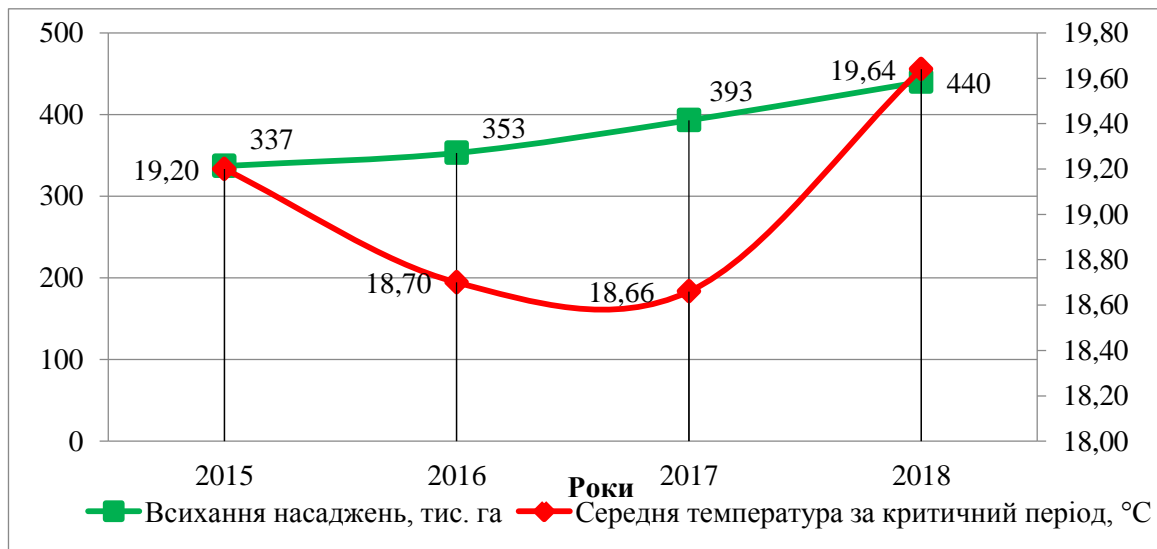


Рис. 1.3. Залежність всихання деревних насаджень в Україні за критичні періоди 2015 – 2018 років від середньої температури

Як можна побачити з рис. 1.3, незначне зростання середньої температури критичного періоду за 2015 – 2018 роки (близько 2%) веде до незначного (до 19,8%), майже лінійного збільшення площ всихань деревних насаджень. Таким чином, можна опосередковано вважати залежність збільшення площ всихань деревних насаджень від приросту середньої температури за критичний період, рис. 1.3 [2, 20-22].

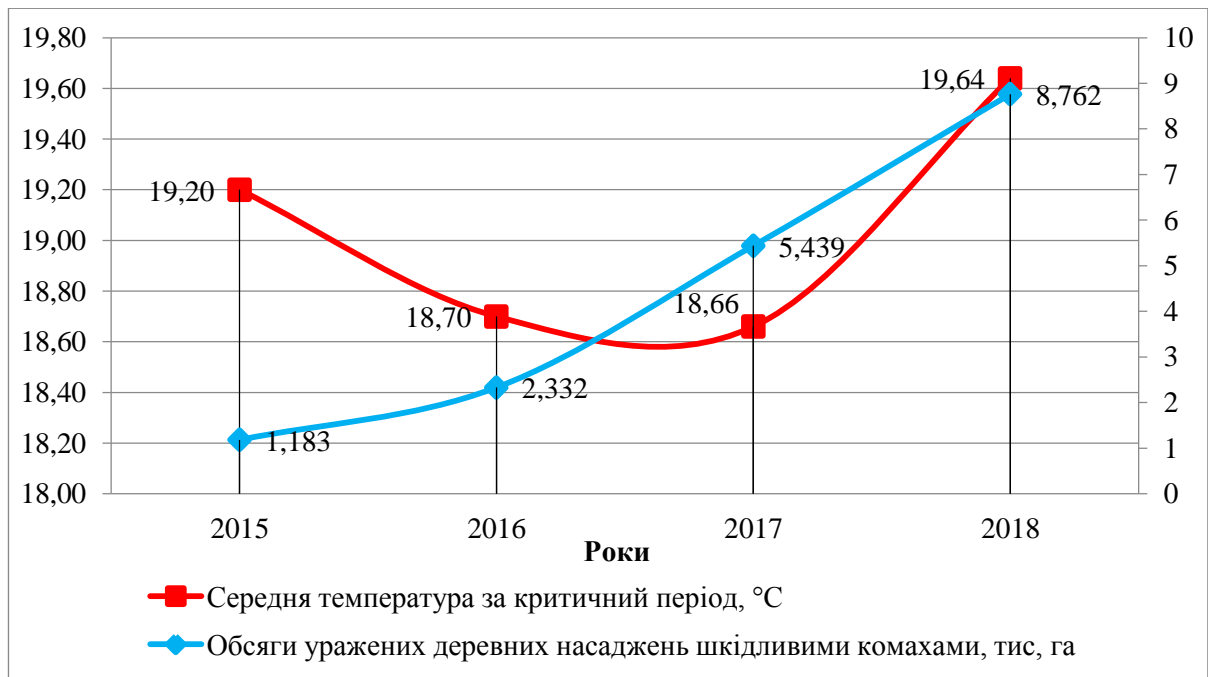


Рис. 1.4. Залежність ураження деревних насаджень шкідниками в Україні за 2015 – 2018 роки від середньої температури за критичний період

Як можна побачити з рис. 1.4, незначне зростання середньої температури критичного періоду за 2015 – 2018 роки (близько 2%) веде до значного (до 32,5%), майже лінійного збільшення площ насаджень, уражених шкідливими комахами.

Зазвичай, найбільшої шкоди комахи наносять кронам та стовбуровим тканинам дерев. Так, деякі комахи сильно об'їдають крони рослин, інші ж, в результаті своєї життєдіяльності, утворюють ходи у внутрішній структурі, що призводить до поступового висихання дерев [20 – 22].

Слід зауважити, що досить значні втрати деревних насаджень щорічно виникають в результаті лісових пожеж. При цьому, найбільш небезпечним періодом для виникнення лісових пожеж є період року з квітня по жовтень. Встановлено [23 – 27], що саме в цей проміжок року відбувається найбільша кількість лісових пожеж. На рис. 1.5 відображена динаміка зміни площ лісових пожеж в Україні за 2015 – 2018 роки та кількості пожеж, а також залежність зміни площ лісових пожеж в Україні за 2015 – 2018 роки від зміни середньої температури за критичний період.



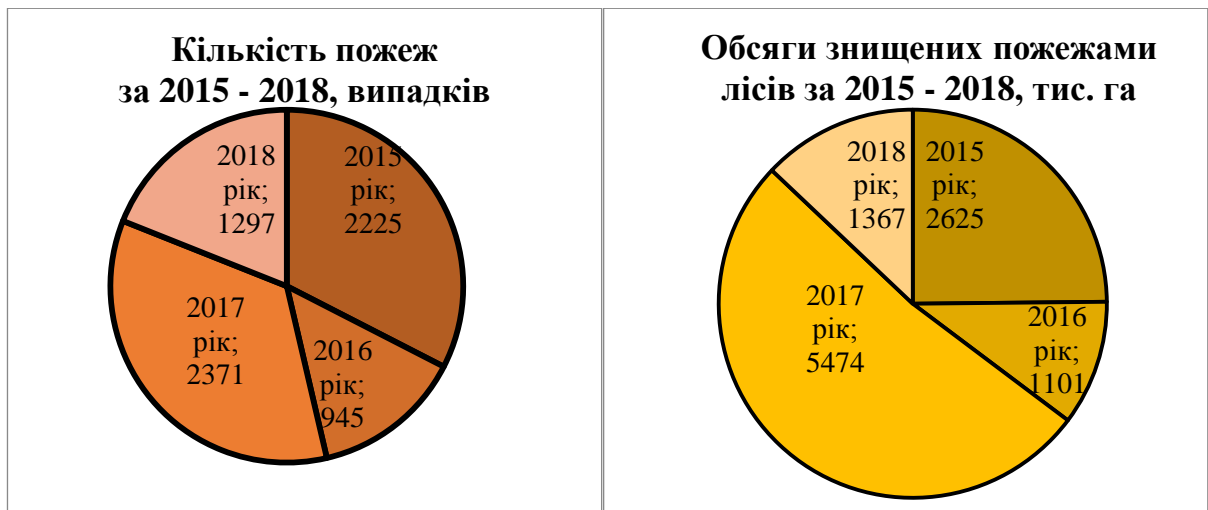


Рис. 1.5. Динаміка зміни площ лісових пожеж в Україні за 2015 – 2018 роки в залежності від зміни середньої температури за критичний період

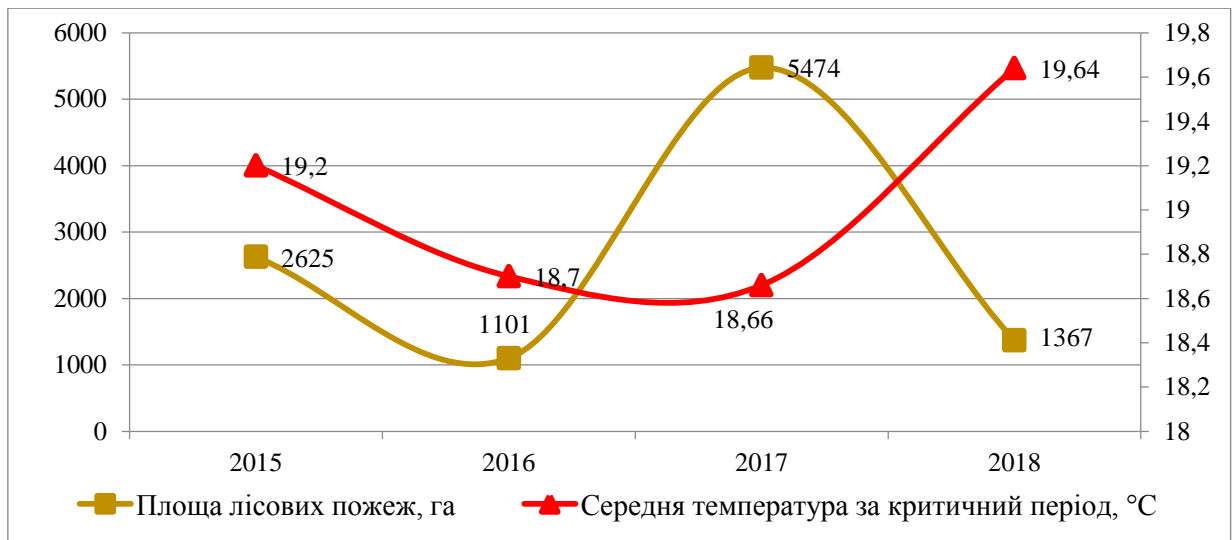


Рис. 1.6. Залежність зміни площ лісових пожеж в Україні за 2015 – 2018 роки від середньої температури за небезпечний період

Графік на рис. 1.6 показує, що при незначних періодичних змінах середньорічної температури за період 2015 – 2018 роки (не більше, як на 8%) веде до нелінійної (також періодичної) зміни площ знищення пожежами деревних насаджень. Цей факт вказує на відсутність прямого зв'язку між зміною площ насаджень знищених пожежами та середньорічною температурою.

В той же час, згідно статистичних даних [25] встановлено, що до основних причин вигорання значних площ деревних насаджень в посушливі роки через лісові пожежі є: недотримання вимог пожежної безпеки до деревних насаджень (особливо в південних та східних областях), нестача достатньої кількості пожежних водоймищ, спецтранспорту та недосконалість проведення мір щодо попередження пожежної небезпеки в лісових та лісопаркових насадженнях. При цьому, основною причиною виникнення лісових пожеж (порядку 96 – 98% усіх випадків) залишається низька культура населення при поводженні з вогнем у лісопаркових зонах [25].

Таким чином, визначені фактори, що здійснюють найбільш негативний вплив на СС деревних насаджень і усунення яких на сьогодні не представляється можливим: кліматичні, біотичні та екологічні фактори. Зокрема, це погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунтів (в першу чергу, водневого показника  $pH$  і солоності) та щорічне збільшення середньої температури повітря, що значним чином впливають на захворювання та прискорене всихання дерев, а також масове розмноження шкідливих комах та виникнення і розповсюдження лісових пожеж.

## **1.2 Методи та засоби визначення та контролю санітарного стану деревних насаджень**

На сьогодні в Україні, основним методом контролю деревних насаджень є державний нагляд, який відбувається за визначеною процедурою [25 – 27]. В першу чергу, проводиться візуальний огляд деревних насаджень та визначається їх стан. Зокрема, особи, що є відповідальними за стан лісових, садово-паркових та муніципальних зон насаджень, у своїх звітах мають подавати таку інформацію [26]:

- про стан деревних насаджень;
- про розроблені та реалізовані заходи щодо збереження деревних насаджень;
- про обсяги реалізованих заходів щодо покращення СС деревних насаджень;

– про заходи запобігання чи ліквідації наслідків стихійного лиха чи аварій.

Згідно з постановою Кабінету міністрів України від 26 жовтня 2016 року «Санітарні правила в лісах України» санітарний стан деревних насаджень розділяється на категорії для хвойних та листяних рослин [26, 27] – Додаток А.

Окрім, державного нагляду за зовнішніми ознаками для визначення СС деревних насаджень використовуються також інструментальні методи. Такі методи спрямовані на пошук внутрішніх дефектів деревних насаджень, а тому вони є більш ефективними. Класифікація інструментальних методів дослідження СС деревних насаджень наведена на рис. 1.7 [28 – 46].

Інструментальні методи визначення санітарного стану дерева				
Резистографічний	Бороскопічний	УЗ-томографія	Теплометричний	Іонометричний
Принцип дії: Вимірюється механічний опір дерева в процесі свердління	Принцип дії: Аналізується оптичне зображення внутрішньої будови	Принцип дії: Досліджується швидкість проходження УЗ-хвиль в площині	Принцип дії: Аналізується величина та напрям сокооруху рідини в заболоні	Принцип дії: Аналізується зміна рівня водневого показника
<u>Прилади технічного забезпечення</u> RESISTOGRAPH 4452-S, R-650	<u>Прилади технічного забезпечення</u> Бороскоп-ендоскоп 1200 P F150	<u>Прилади технічного забезпечення</u> Комплекс УЗ-томографії «АРБОТОМ®»	<u>Прилади технічного забезпечення</u> SL5 Розумний логгер (Smart logger)	<u>Прилади технічного забезпечення</u> pH-метр ЕТР-303
<u>Посилання на літературні джерела</u> [28 – 33]	<u>Посилання на літературні джерела</u> [32, 34, 35]	<u>Посилання на літературні джерела</u> [35 – 43]	<u>Посилання на літературні джерела</u> [44, 45]	<u>Посилання на літературні джерела</u> [46]

Рис. 1.7. Класифікація інструментальних методів дослідження санітарного стану деревних насаджень

Кожен з інструментальних методів (рис. 1.7) спрямований на дослідження внутрішніх параметрів окремих дерев.

*Резистографічний метод* визначення СС в деревині був розроблений на початку 2000 року в німецькій компанії Rinntech [28 – 33]. Пристрій виконує пошук зміни структури внутрішньої будови, наприклад, пустот та

гнилі, рис. 1.8. При цьому, резистограф враховує опір дерева під час його свердління.

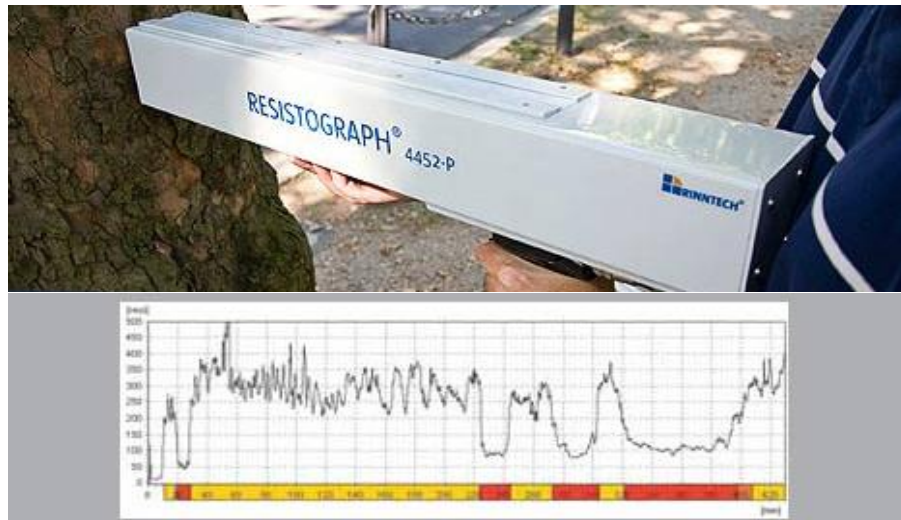


Рис. 1.8. Резистограф: зовнішній вигляд (вгорі)  
та результат дослідження (внизу)

Проведення вимірювання проходить за наступною схемою [32]:

- Дослідник якомога щільніше притискає пристрій до дерева.
- Починається свердління стовбура дерева (свердло  $\varnothing 3$  мм).
- Під час свердління пристрій реєструє електричну потужність, яку потребує мотор для свердління з постійною швидкістю.
- Отримана інформація потрапляє на операційний блок, який з'єднаний з резистографом.
- Вбудований принтер в режимі реального часу друкує графік залежності опору від глибини проникнення свердла.

*Бороскопічний метод дослідження* розроблений японською компанією Olympus [34 – 35]. Принцип роботи бороскопу оснований на принципах волоконної оптики. Складається бороскоп зі сталеві трубки, яка включає спеціальну оптичну систему, рис. 1.9.



Рис. 1.9. Бороскоп-ендоскоп 1200 P F150: зовнішній вигляд [34]

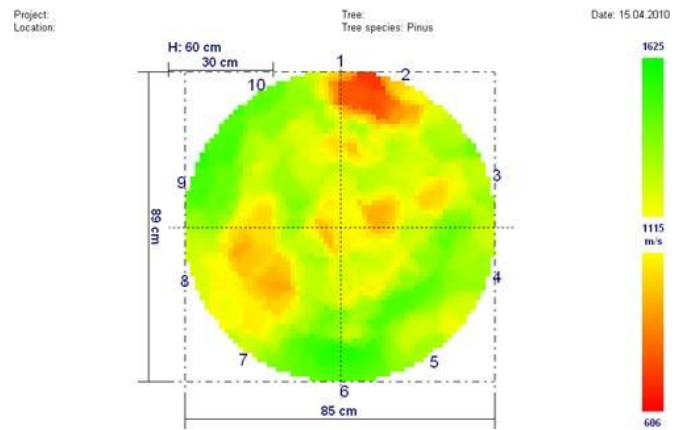
З боку досліджуваного об'єкту знаходиться об'єктив, а з боку дослідника – окуляр. Зовнішнє джерело світла з'єднується з бороскопом за допомогою кабелю. Проведення вимірювання здійснюється за наступною схемою [34, 35]:

1. Дослідник якомога щільніше притискає пристрій до дерева.
2. Починається свердління стовбура дерева (свердло  $\varnothing 10$  мм).
3. В отвір вставляється трубка бороскопа, вмикається зовнішнє джерело світла та через окуляр проводиться огляд стінок висвердленого отвору. Отримане зображення аналізується.
4. Після проведення дослідження отвір закривається деревною пробкою.

*Метод ультразвукової томографії* побудований на закономірностях швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу від щільності деревини. Так, швидкість ультразвукового (УЗ) сигналу в ділянках стовбура, які уражені гниллю буде меншою, ніж в здорових ділянках. Для використання даного методу [35 – 43] німецькою компанією «Rinntech» був розроблений комплекс апаратури ультразвукової томографії «АРБОТОМ<sup>®</sup>», рис. 1.10.



а.



б.

Рис. 1.10. Зовнішній вигляд УЗ-томографу «Арботрон» (а) та отримана томограма (б)

Проведення вимірювання проходить за наступною схемою [35,36,43]:

- На досліджуваному дереві на відстані 10 – 15 см один від одного закріплюються феритові стрижні, які занурюються вглиб стовбура на глибину 2 – 3 см.
- На феритові стрижні встановлюються датчики, кількість яких залежить від діаметру дерева, але не менше двох.
- Перший датчик з'єднується кабелем з акумуляторним модулем, після чого усі датчики об'єднуються один з одним кабелем за послідовною схемою.
- Запускається програмне забезпечення – система розпочинає свою роботу.
- Результати проведеного дослідження миттєво з'являються на моніторі у вигляді графічного зображення дерева з кольоровим відображенням наявних в ньому дефектів.

*Теплометричний метод* вимірювання швидкості руху потоку рідини в заболоні Human Resources Management був розроблений Університетом Західної Австралії та партнерськими організаціями [44, 45]. Принцип роботи оснований на використанні короткого імпульсу тепла в якості індикатора, рис. 1.11.

date	time	SVP00038	SVP00038	SVP00039	SVP00039
dd/mm/yy	hh:mm:ss	A cm/hr	B cm/hr	C cm/hr	D cm/hr
15/09/2005	13:40:00	11.3	3.77	6.3	1.54
15/09/2005	13:50:00	10.58	3.43	6.16	1.7
15/09/2005	14:00:00	12.27	4.11	6.91	1.62
15/09/2005	14:10:00	11.09	3.07	6.75	1.87
15/09/2005	14:20:00	10.46	3.28	6.46	1.86
15/09/2005	14:30:00	10.4	3.55	6.37	1.42

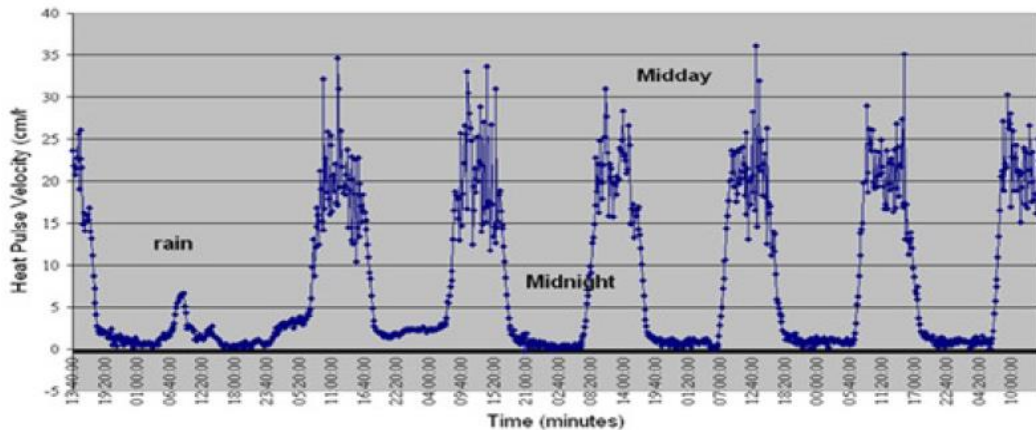


Рис. 1.11. Результати термометричного дослідження

Вимірювання дозволяє визначити величину і напрям потоку рідини в заболоні, а також інтенсивність транспірації. Проведення вимірювання проходить в такій послідовності [45]:

1. Датчик фіксується на досліджуваному дереві.
2. Вмикається пристрій, який автоматично починає процес отримання даних.
3. Результати дослідження представляють собою графік, а також таблицю з даними за кожні 10 хвилин.

*Іонометричний метод* визначення фізико-хімічних показників (водневого показника  $pH$ , показника солоності, та ін.) може бути використаний для встановлення санітарного стану (СС) деревних насаджень. На сьогодні, інформація у відкритих джерелах про взаємозв'язок між показниками СС дерев та їх фізико-хімічними показниками відсутня, проте, така залежність була встановлена на прикладі взаємозв'язку водневого показника  $pH$  ґрунту зі станом сільськогосподарських культур [46]. Тому, з вищевказаного можна зробити висновок, про високоймовірну залежність між

показниками СС дерев та фізико-хімічними показниками. Ця гіпотеза лягла в основу подальших наукових досліджень.

Основні переваги та недоліки методів та засобів визначення та контролю СС деревних насаджень, виявлені в результаті аналізу розглянутих методів, були узагальнені та наведені в табл. 1.5.

Табл. 1.5. Узагальнення переваг та недоліків методів визначення та контролю санітарного стану деревних насаджень

Метод	Переваги	Недоліки
Державний (візуальний) нагляд	- Простий в застосуванні - Не потребує високої кваліфікації працівників	- Низький рівень інформативності - Обмежений інформацією лише про зовнішній стан дерев
Резистографічний	- Середній рівень інформативності - Дозволяє дослідити внутрішню структуру дерева	- Складний у застосуванні - Потребує високої кваліфікації працівників - Високовартісний
Теплометричний метод	- Середній рівень інформативності - Дозволяє оцінити рівень транспірації та швидкість потоку деревної рідини	- Складний у застосуванні - Потребує високої кваліфікації працівників - Високовартісний - Значна вага приладної бази
Бороскопічний	- Високий рівень інформативності - Можливість дослідити внутрішню структуру дерева - Можливість фотофіксації внутрішньої будови	- Складний у застосуванні - Потребує високої кваліфікації працівників - Високовартісний - Суттєво пошкоджує внутрішню структуру
Метод ультразвукової томографії	- Високий рівень інформативності - Оцінює стан дерева в площині - Не потребує високої кваліфікації працівників	- Складний в застосуванні - Високовартісний - Значна вага приладної бази
Іонометричний метод	- Можливість дослідити зміни в фізіологічних процесах дерева - Не потребує високої кваліфікації працівників - Невисока вартість - Відносно мала вага приладної бази	- Необхідне використання декількох пристроїв одночасно - Частково пошкоджує внутрішню структуру - Низький рівень інформативності

Таким чином, проаналізувавши табл. 1.5, зроблено висновок про те, що найбільш перспективним методом контролю СС дерев є іонометричний метод. В той же час, застосування даного методу в наукових дослідженнях



для контролю СС масивів деревних насаджень є обмеженим в зв'язку з відсутністю засобів автоматизації такого моніторингу. Зокрема, для контролю СС масивів деревних насаджень застосування іонометричного методу передбачає залучення таких засобів, як: рН-метрії, соліметрії, рефлектометрії, термометрії, а також статистично-математичного апарату для оброблення та аналізу отримуваних даних. Огляд існуючих рішень щодо апаратно-програмного забезпечення процесу моніторингу СС деревних насаджень буде проведений в наступних пунктах даного розділу.

### **1.3 Сучасні системи моніторингу та аналізу в садово-парковому та лісовому господарстві**

На сьогоднішній день необхідність проведення регулярного моніторингу деревних насаджень обумовлена постійним впливом на такі насадження природних та антропогенних чинників. Головним завданням є здійснення дистанційного моніторингу для визначення оптимального плану дій та ефективного захисту таких насаджень від впливу негативних факторів [26, 48, 53, 57].

На більшості території України найбільш розповсюдженим методом моніторингу СС деревних насаджень є візуальний огляд [49– 64]. З розвитком сучасних технологій виникає все більша необхідність використання систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також технологій, в основі яких знаходяться геоінформаційні системи та технології (ГІС – технології).

Класифікація основних видів моніторингу деревних насаджень представлена в табл. 1.6 [58].

Табл. 1.6. Класифікація видів моніторингу деревних насаджень

За територіальним охопленням	Локальний	моніторинг невеликої за площею території
	Місцевий	моніторинг в межах одного району, селища або міста
	Регіональний	моніторинг в межах однієї області
	Національний	моніторинг в межах однієї країни
	Глобальний	моніторинг частини світу або континенту
За методом спостережень	Картографічний	моніторинг передбачає створення звичайних карт, схем, планів та абрисів
	Геоінформаційний	моніторинг передбачає створення електронних карт
За призначенням	Загальний (стандартний)	моніторинг проводиться за основними показниками для всієї території
	Науковий (фоновий)	моніторинг здійснюється з використанням багатьох показників
	Спеціальний (оперативно-кризовий)	моніторинг проводиться за точно визначеним набором показників на конкретній вузькій або на всій території (наприклад, для оцінки пожежонебезпеки)
За частотою спостережень	Безперервний	моніторинг проводиться постійно, наприклад, на небезпечних ділянках для пожежонебезпечного періоду
	Системний	моніторинг здійснюється за спеціальним планом та за чітко визначеними правилами
	Періодичний	моніторинг проводиться в певний період, наприклад, для визначення межі снігового покриву або фенологічного стану лісів
За видами спостережень	Дистанційний	моніторинг проводиться віддалено від території спостереження
	Геодезичний	моніторинг проводиться безпосередньо на території спостереження
	Комбінований	комбінований варіант дистанційного та геодезичного видів моніторингу

Основними функціональними завданнями моніторингу деревних насаджень є [61 – 63]: захист від пожеж; контроль за лісопатологічним станом; нагляд за територіями з великим рівнем забруднення оточуючого середовища радіонуклідами; контроль за порядком лісовідновлення та лісокористування; проведення оцінки стану екосистем рослинних насаджень; актуалізація інформації.

Для проведення контролю пожеж часто використовують засоби ДЗЗ. Супутниковий метод проведення моніторингу лісу є досить інформативним та дешевим. Це зумовлене тим, що супутники роблять знімки за допомогою сканерів, які можуть працювати в ІЧ-спектрі. Отримані знімки дозволяють

визначити місця різкої зміни температур (наприклад, лісові пожежі). Обробка прив'язки до географічного положення знімків відбувається на космічному апараті. Після цього здійснюється цифровий аналіз даних, їх візуальне розшифрування та подальша графічна інтерпретація (рис. 1.12) [63].

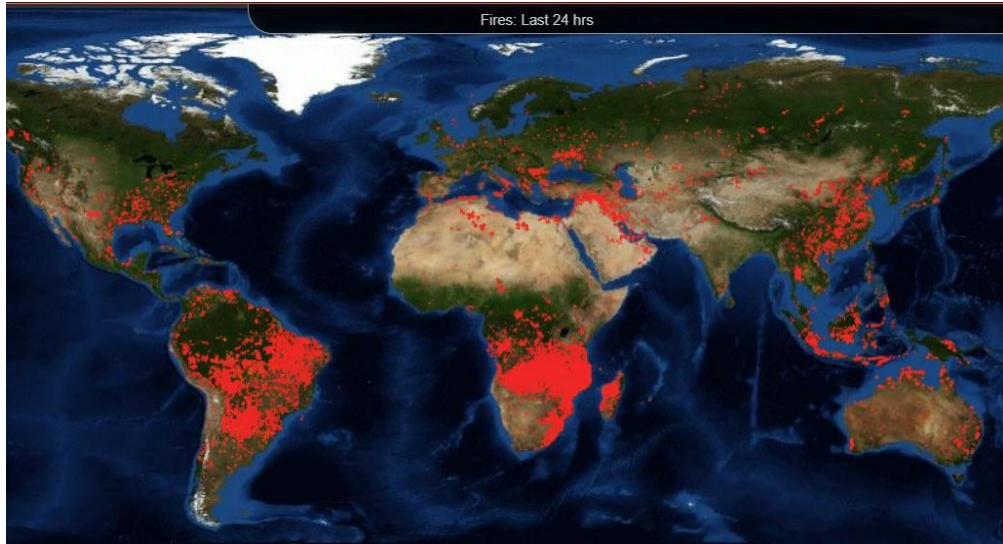


Рис. 1.12. Супутникова карта пожеж FIRMS [67]

Результати моніторингу можуть подаватися в двох режимах відображення: автоматичному та інтерактивному [64-72].

На сьогодні розроблені спеціальні системи дистанційного зондування Землі для вільного доступу до відкритих даних, а саме: MODIS, GOES, METEOSTAT, GMS та інші. Такі карти пожеж дозволяють визначати площу пожеж, а також проводити точну їх статистику. В Україні єдиною офіційною структурою, яка здійснює повний спектр дій в цій сфері є Національний центр управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ). Ця організація виконує функції Національного Оператора систем дистанційного зондування Землі [64].

Основними недоліком методу супутникового моніторингу пожеж FIRMS є неможливість визначення конкретних координат пожежі. Також є проблема збереження даних та утворення бази даних для подальшої обробки.

Контроль за лісопатологічним станом, зазвичай, відбувається в рамках візуального огляду. Такий спосіб моніторингу передбачає проходження представником лісового господарства території та фіксації СС деревних

насаджень. Вся інформація заноситься в спеціальний документ «Повідомлення про появу ознак погіршення санітарного стану лісових насаджень». В такий документ вносяться, зокрема, дані про область розташування, площу, таксаційні характеристики насаджень, а також інформація про появу ознак погіршення їх санітарного стану та пошкодження [26].

Основним недоліком візуального огляду є необхідність «ручного» запису отриманої інформації щодо кожного з об'єктів дослідження. Цей метод на сьогодні не є автоматизованим.

Перспективним методом моніторингу для отримання надійних та якісних даних є метод, побудований на принципах дії геоінформаційних систем (ГІС). При цьому найбільш повні та інформативні дані отримують при поєднанні вимірювань і спостережень (аерокосмічні дані).

Проведення моніторингових досліджень з використанням аерокосмічних даних можна розділити на чотири стадії [66]:

1. Збір та попередня обробка аерокосмічних даних.
2. Збір та накопичення наземних даних щодо стану лісових характеристик
3. Одночасна обробка всіх отриманих даних.
4. Аналіз отриманих результатів з подальшим прогнозуванням можливостей розвитку лісів.

Класифікація даних (метод ДЗЗ) за просторовим розрізненням для проведення моніторингу та аналізу стану лісових насаджень представлена в табл. 1.7 [66].

Загалом ГІС, що призначена для моніторингу лісу, рис. 1.13 [66], має відповідати наступним умовам [62–72]:

- База даних (БД) про певну ділянку має зберігатися не лише на основному сервері, але й на сервері лісівництва, якому підпорядкована досліджувана ділянка.
- Вся картографічна та атрибутивна інформація має бути представлена у вигляді одного набору даних та керуватися однією системою управління базою даних (СУБД).

Табл. 1.7. Класифікація даних ДЗЗ за просторовим розрізненням

Просторове розрізнення	Опис даних	Приклади джерел отримання даних
низьке, близько 1000 м	оглядові космічні дані в оптичному діапазоні низького радіусу, зі зніманням даних на відстані до 10 км в радіодіапазоні з використанням пасивних засобів	супутники NOAA, «Океан», «Метеор-3М»
середнє, 100 – 200 м	космічні знімки середнього радіусу	супутники «MODIS», Океан (з тепловими каналами 2 – 5 мкм) та «Ресурс-01»
високе, 10 – 20 м	космічні знімки високого радіусу оптичного та радіодіапазонів	супутники типу SPOT «Ресурс-01», «Ресурс-Ф» та Landsat
надвисоке 1 – 5 м	аерокосмічні та космічні знімки надвисокого радіусу оптичного та радіодіапазонів	супутники типу Ikonos

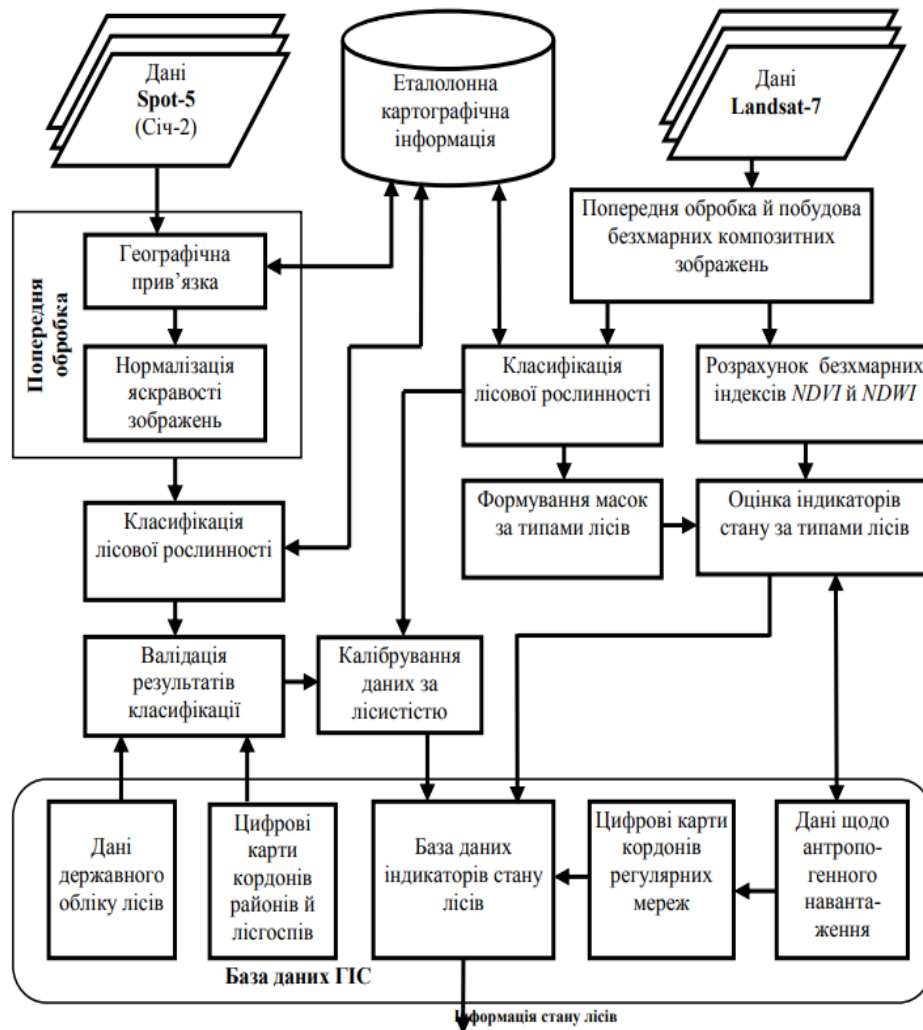


Рис. 1.13. Структурно-логічна схема оцінки стану лісів з використанням супутникових даних та ГІС [6]

- Вузлова та центральна БД мають відповідати одна одній.
- Інтерфейс ГІС має бути доступним та зрозумілим для користувача.
- ГІС повинна надавати можливість відбору даних за певними критеріями.

#### 1.4 Математичні моделі впливу негативних факторів на санітарний стан деревних насаджень

Одними з найсуттєвіших факторів, що впливають на СС деревних насаджень є кліматичні. Останніми роками в Україні все частіше стали фіксувати суттєві зміни клімату, що проявляються збільшенням випадків посух, повенів, ураганів тощо. Такий кліматичний дисбаланс впливає на процес зміни рівня вологості в повітрі та ґрунті, що, в свою чергу, призводить до збільшення кількості сухостоїв (рис. 1.14) [74].



Рис. 1.14. Діаграма площ сухостоїв на прикладі областей Карпатського регіону станом на 2018 рік [74]

Тому, математичні розрахунки з метою проведення оцінки впливу негативних кліматичних факторів на СС деревних насаджень є актуальним проблемним питанням, для вирішення якого проведено багато теоретичних та експериментальних досліджень [74 – 88]. При цьому, більшість математичних моделей (ММ) впливу зовнішніх факторів на стан будь-якої екосистеми мають певну схожість.

В той же час, системи моніторингу, а саме, їх системи управління, в яких використовуються вищезазначені ММ також є певним чином уніфікованими. Кожен з блоків системи моніторингу має свою технічну, науково-методичну, організаційну та структурну базу, рис. 1.15 [66].

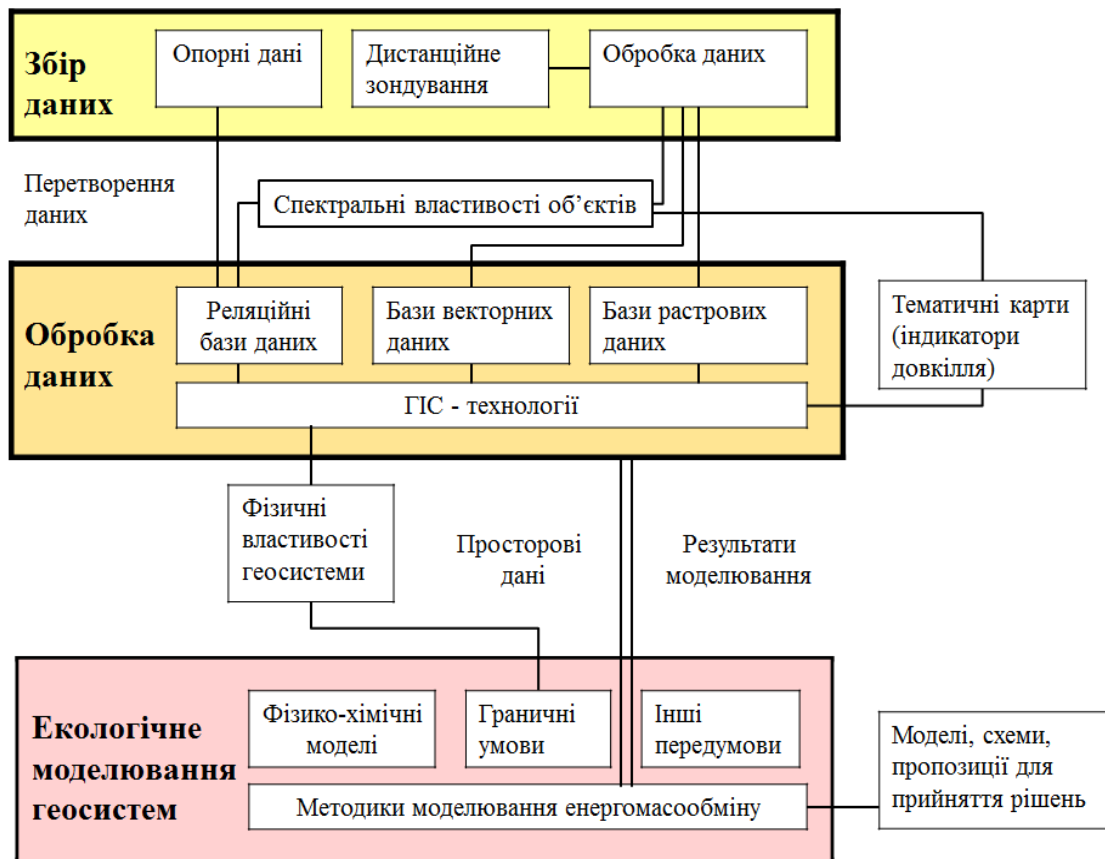


Рис. 1.15. Структурна база системи моніторингу екологічних об'єктів

Використання ММ допомагає в розробці апаратно-програмних засобів для опису, вивчення, кількісної характеристики досліджуваних процесів та явищ. В зв'язку з чим, на початковій стадії дослідження були розглянуті та проаналізовані існуючі ММ, які застосовуються для визначення та прогнозування впливу зовнішніх факторів на стан різних екосистем.

Результати аналізу застосування різних ММ представлені в табл. 1.8.

Табл. 1.8. Характеристики деяких математичних моделей впливу зовнішніх факторів на стан екосистем

Математична модель	Досліджувані характеристики	Переваги	Недоліки
Модель процесів забруднення ґрунтів як результату технологічних процесів [88]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Зміна концентрації речовини в часі,</li> <li>- Розподіл шкідливої речовини в модельній області</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Визначення зміни концентрації речовини в часі при зміні відстані від зони витоку</li> <li>- Визначення розподілу шкідливої речовини в модельній області при наявності витоків різної інтенсивності</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Розрахунок розподілу речовини можливий лише в модельній області</li> <li>- Неможливо застосовувати на карті реальної місцевості з урахуванням рельєфу</li> </ul>
Модель розвитку двовидового лісу [89]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Щільність біомаси</li> <li>- Вологість</li> <li>- Заболоченість</li> <li>- Освітленість</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Визначення залежності щільності біомаси від освітленості на заболоченості</li> <li>- Залежність вимирання лісу від нестачі вологи</li> <li>- Врахування двовидової конкуренції</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Не враховується вимирання лісу від впливу шкідливих комах та погодних умов.</li> </ul>
Модель періодично підтоплювальної території [90]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Водний баланс</li> <li>- Вологість ґрунту</li> <li>- Рівень ґрунтових вод</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання інтелектуальної моделі водного балансу в певній точці, а також території в цілому</li> <li>- Прогнозування в умовах впливу антропогенних факторів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання передбачено лише для дослідження рівня ґрунтових вод в окремо взятих свердловинах</li> </ul>
Модель поширення пожеж та осередків шкідливих комах в соснових лісах. [91]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Середня площа мікроосередків, га</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Прогнозування площі лісів з високою загрозою поширення осередків соснових та рудих пильщиків в ДП «Кремінське ЛМГ»</li> <li>- Можливість відображення результатів на карті</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використовується для чітко визначеної території ДП «Кремінське ЛМГ»</li> </ul>
Математична модель динаміки запасів вуглецю в лісових насадженнях [92]	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Запас стовбурної деревини, м<sup>3</sup></li> <li>- Запас вуглецю у фітомасі, т</li> <li>- Щільність запасів вуглецю, т/га</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Визначення загального розподілу стоку вуглецю у стовбурну деревину на карті,</li> <li>- Визначення загального розподілу запасу вуглецю на пробних площах на карті</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- не передбачає використання для аналізу санітарного стану</li> </ul>

Таким чином, серед розглянутих в табл. 1.8 ММ екосистем найбільш перспективними для подальшого удосконалення в межах даної наукової роботи можна вважати модель процесів технологічного забруднення ґрунтів та модель періодично підтоплювальних територій [88, 90].



## **1.5 Узагальнення результатів аналізу. Обґрунтування напрямків досліджень**

З врахуванням теми роботи було сформовано мету дисертаційного дослідження – підвищення ефективності моніторингу санітарного стану деревних насаджень шляхом оперативного визначення категорій санітарного стану як окремих дерев, так і їх масивів за рахунок упровадження дистанційної моніторингової системи, що складається з системи датчиків і дистанційно розташованої системи прийому, аналізу та обробки інформації та дозволяє за зміною негативних факторів зовнішнього середовища, що впливають на якісні показники деревного соку, здійснити розподіл деревних насаджень за їх санітарним станом.

До факторів, що впливають на якісні показники деревного соку, була віднесена низка фізико-хімічних показників ґрунтів засадження, крім того запропонований моніторинг передбачає контроль фізико-хімічних показників самого деревного соку безпосередньо. Отже в цілому запропонована моніторингова система буде фіксувати та враховувати такі показники: водневий показник рН, солоність ґрунту, цукровість та в'язкість соку.

Гіпотеза дисертаційного дослідження полягає в тому, що при застосуванні системи автоматизованого дистанційного моніторингу санітарного стану масивів деревних насаджень, яка використовуватиме математичну модель для зонування ділянок деревних насаджень за категоріями санітарного стану та закономірності зміни якісних показників деревного соку від фізико-хімічних показників ґрунтів, зможуть бути визначені співвідношення таких насаджень за санітарними категоріями, площі ділянок з різними ступенями пошкодження та спрогнозована динаміка розвитку пошкоджень. Це дозволить підвищити ефективність моніторингу за рахунок об'єктивної оцінки санітарного стану ділянок з деревними насадженнями та запровадження попереджувальних дій для запобігання подальшому погіршенню цього стану.

## 1.6 Висновки до розділу 1

Проведено детальний аналіз зовнішніх негативних факторів, які впливають на санітарний стан деревних насаджень. Встановлено, що найбільш негативний вплив на СС деревних насаджень здійснюють такі зовнішні фактори, як: кліматичні, біотичні та екологічні. Зокрема, це погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунтів (в першу чергу, водневого показника  $pH$  і солоності) та щорічне збільшення середньої температури повітря, що значним чином впливають на захворювання та прискорене всихання дерев, а також масове розмноження шкідливих комах та виникнення і розповсюдження лісових пожеж.

На основі аналізу статистичних даних за період 2015 – 2018 років щодо площ пошкоджень деревних насаджень та щодо кліматичних змін (зокрема, збільшення середньої температури за критичний період) побудовані залежності, які дозволили перевірити гіпотезу щодо залежності пошкоджень деревних насаджень від зміни температури.

Розглянуто методи та засоби визначення та контролю санітарного стану деревних насаджень та розподілу їх за категоріями аварійності. Показано, що існуючі інструментальні методи визначення санітарного стану деревних насаджень в більшості випадків мають значну вартість, складність та обмеженість у використанні та потребують високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Проведено класифікацію існуючих систем моніторингу, що дозволила встановити відсутність ефективної та зручної системи дистанційного моніторингу санітарного стану окремих дерев та їх насаджень у лісових, садово-паркових та муніципальних зонах.

Розглянуто існуючі математичні моделі, які застосовують для врахування впливу негативних факторів на різноманітні екосистеми, проаналізовано можливість їх застосування для розподілу деревних насаджень за категоріями в залежності від даних дистанційного моніторингу їх санітарного стану.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ НЕГАТИВНИХ ФАКТОРІВ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА САНІТАРНИЙ СТАН ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ

В другому розділі проведено обґрунтування вибору об'єктів для проведення експериментально-розрахункових досліджень та математичного моделювання.

Визначено основні критерії вибору деревних насаджень для моніторингу санітарного стану. Проведено вибір об'єкту дослідження [93 – 94].

Проаналізовано методи проведення та оброблення експериментальних досліджень. Зокрема розглянуто існуючі методи визначення показників рН та солоності ґрунту [95 – 100] та уточнено методики визначення цих показників при вимірюваннях в зоні кореневого живлення дерева, а також розглянуто [103, 104] та уточнено експрес методики, які можуть бути використані для швидкісного аналізу таких показників деревного соку, як: сахаристість, водневий показник рН та в'язкість.

Проведено розробку та апробацію методів обробки експериментальних результатів дослідження [105 – 112]. Виведено загальне рівняння регресії та розраховано статистичні характеристики моделей [112, 113]. Розроблено метод прогнозування терміну життєвого циклу дерева в залежності від зміни якісних показників деревного соку [96 – 113].

Розроблено математичну модель для реалізації зонування деревних насаджень за їх санітарним станом, складено алгоритм та написано програму розподілу деревних насаджень на заданих ділянках за їх санітарними категоріями [112-114]. Запропоновано послідовність проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

## 2.1 Обґрунтування вибору об'єктів та засобів проведення досліджень

Вибір об'єктів є одним з найважливіших параметрів, що найбільше впливають на якість та достовірність отриманих результатів після проведення моніторингу.

Розподіл деревних насаджень можна здійснювати за такими класифікаційними ознаками:

- за антропометричними даними: вік, висота та діаметр стовбуру тощо;
- за родовою ознакою: береза, сосна, дуб та інші;
- за видом листя: хвойні або широколистяні;
- за географічним розташуванням: тропічні (ростуть недалеко від екватора), або ж північні (ростуть досить далеко від екватора).

Зазвичай, для проведення моніторингу обирають чітко визначений перелік класифікаційних ознак. Такий вибір зумовлений необхідністю звуження області проведення моніторингу, з метою підвищення точності отриманих результатів.

Загальна площа лісового фонду Черкаської області складає близько 338,6 тис. га, з яких вкриті лісом – 322,4 тис. га [93]. В наслідок посиленого впливу антропогенного фактору XVIII ст., площі вкриті лісом почали дуже швидко зменшуватись. Відновлення лісового фонду почалося з 50-х років XX ст. Понад 70% сучасних лісових насаджень Черкаської області були створені штучно, а середній вік цих дерев становить приблизно 62 роки. Цей факт був визначальним, оскільки штучна висадка дерев здійснювалася за певною схемою, що в подальшому дозволило об'єктивно спростити процес створення карт для нанесення та кодування об'єктів дослідження.

В лісах Черкащини найбільш домінуючими деревними породами є: твердолистяні, шпилькові, м'яколистяні та інші, рис. 2.1 [93].

За даними державного агентства лісових ресурсів України загальна площа всихання лісів за 2018 рік склала 330 тис. га, з яких 150 тис. га склала площа всихання саме соснових насаджень [93, 94].

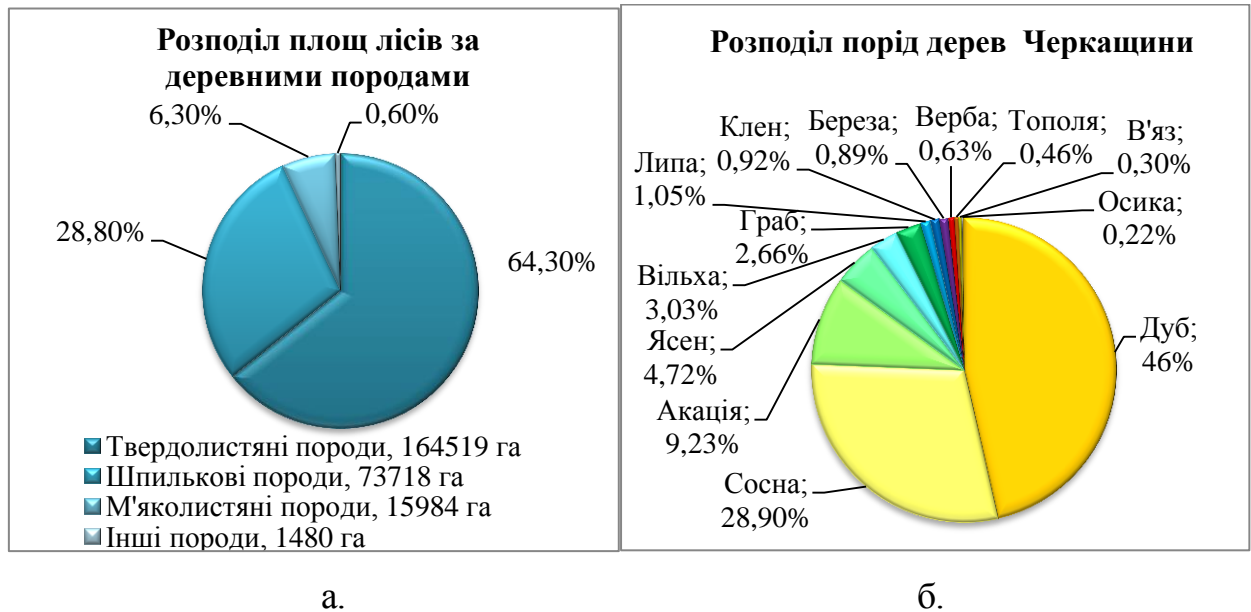


Рис. 2.1. Діаграми розподілу: а) площ лісів за деревними породами; б) дерев Черкащини за їх родовою ознакою

Оскільки, площі всихання сосни становлять близько половини від загальної кількості цих площ в Україні та в межах Черкаської області, сосна є одною з найбільш поширених і, в той же час, найбільш вразливих до швидкої загибелі порід дерев Черкащини, тому сосна була обрана в якості основного об'єкту дослідження, табл. 2.1.

Табл. 2.1. Порядок вибору об'єкту для проведення моніторингу санітарного стану за класифікаційними ознаками

Класифікаційна ознака	Узагальнене значення	Результат вибору об'єкту дослідження
Географічне розташування	Помірний кліматичний пояс	Україна, Черкаська обл.
Родовід	Дерево родини соснових	Сосна звичайна
Антропометричні дані	Діаметр Вік	30 – 50 см 60 – 70 років

Вибір об'єктів дослідження проводився в такій послідовності:

1. Виділення конкретної зони проведення дослідження;
2. Підбір дерев в межах обраної зони за вказаними параметрами.
3. Присвоєння коду кожному з обраних дерев (наприклад, ДО-1, ДО-2).
4. Нанесення кожного досліджуваного об'єкту на карту зони моніторингу.

Санітарний стан насаджень може залежати від деяких характеристик соку, а саме від водневого показника ( $pH$ ), цукровості та в'язкості.

Тому в табл. 2.2 – табл. 2.4. представлено результати аналізу основних засобів вимірювання водневого показника ( $pH$ ), цукровості розчинів та методів вимірювання в'язкості [95-98].

Табл. 2.2. Засоби вимірювання водневого показника ( $pH$ )

Засіб	Вимірювані параметри	Особливості використання	Переваги та недоліки
Кислотно-основні індикатори	Рівень $pH$	Індикатори, на які нанесені органічні речовини, поміщають в досліджувану речовину, в потім в залежності від зміни кольору індикатора визначається рівень $pH$	<u>Переваги:</u> швидкий, відносно простий. <u>Недоліки:</u> низький робочий інтервал вимірювання
Універсальний індикатор	Рівень $pH$	Сукупність індикаторів, які послідовно змінюють колір червоний – жовтий – зелений – синій – фіолетовий. При чому відтінки в діапазоні червоний – жовтий відповідають кислотному середовищу, зелені – нейтральному середовищу, а сині – основному середовищу	<u>Переваги:</u> швидкий, простий та інформативний, дозволяє вимірювання з точністю до 0,1 одиниці $pH$ <u>Недоліки:</u> ускладнене використання для мутних або забарвлених речовин
$pH$ -метр	Рівень $pH$	Принцип заснований на вимірюванні електродною системою величини ЕРС, яка в свою чергу пропорційна активності іонів водню в досліджуваній рідині	<u>Переваги:</u> швидкий, простий та інформативний, дозволяє вимірювання з точністю до 0,01 одиниці $pH$ . Можливе використання для забарвлених та мутних рідин

Табл. 2.3. Засоби вимірювання цукровості розчинів

Засіб	Вимірювані параметри	Особливості використання	Переваги та недоліки
Універсальний індикатор	Рівень цукровості, ppm	Індикатори, на які нанесені спеціальні сполуки, що реагують з різними цукрами, що містяться в розчинах, поміщають в досліджувану речовину, в потім в залежності від зміни яскравості та відтінків кольору індикатора визначається рівень цукровості	<u>Переваги:</u> швидкий, простий та інформативний, дозволяє вимірювання з точністю до 0,01 ppm <u>Недоліки:</u> вузький робочий інтервал вимірювання
Рефрактометр	Рівень сахаристості ppm	Принцип заснований на вимірюванні показника заломлення світла в розчині цукрів, що пропорційний концентрації останнього в досліджуваній рідині	<u>Переваги:</u> швидкий, простий та інформативний, дозволяє вимірювання з точністю до 0,01 ppm. Можливе використання для рідин з будь-якою концентрацією цукрів в ній

Табл. 2.4. Методи вимірювання в'язкості

Методи	Вимірювані параметри	Особливості використання	Переваги та недоліки
Відносний метод	$\mu$	Для визначення в'язкості досліджуваної рідини, вимірюють час протікання визначеного об'єму між двома точками в капілярі з однаковою температурою, тиском.	<u>Переваги:</u> великий діапазон отримуваних значень, швидкий <u>Недоліки:</u> складний, необхідно проведення додаткових розрахунків
Метод Стокса	$\mu$	Для визначення в'язкості досліджуваної рідини, вимірюють час падіння кульки визначеного радіуса в рідині.	<u>Переваги:</u> великий діапазон отримуваних значень, швидкий <u>Недоліки:</u> складний, необхідно проведення додаткових розрахунків, не зручний для визначення в'язкості соку
Капілярний метод	$\mu$	Для визначення в'язкості досліджуваної рідини, вимірюють час руху досліджуваної рідини від одної відмітки віскозиметра до іншої.	<u>Переваги:</u> великий діапазон отримуваних значень, швидкий, дозволяє отримувати дані з достатньою точністю

В наведених вище таблицях розглянуті основні засоби для визначення в'язкості, цукровості та водневого показника  $pH$ . Для вимірювання даних характеристик соку деревних насаджень найбільше підходить капілярний метод (контрольна перевірка результатів може здійснюватися за методом Стокса), рефрактометричний та іонометричний методи.

Таким чином, обґрунтовано вибір об'єктів та засобів дослідження [93, 94]. В якості об'єкту була обрана сосна звичайна, діаметром стовбура 30 – 50 см, віком 60 – 70 років.

Також були визначені методи вимірювання характеристик соку дерева, а саме: вимірювання в'язкості вирішено здійснювати капілярним методом; цукровості – рефрактометричним методом; водневого показника – іонометричним методом [95–97].

## **2.2 Методи проведення експериментальних досліджень та оброблення результатів**

Серед основних розрахунково-експериментальних методик, що використовувалися в роботі та вперше були запроваджені з метою вимірювання в зоні кореневого живлення дерева слід відмітити уточнені методики визначення показників  $pH$  та солоності ґрунту, а також уточнені методики експрес-визначення якісних показників деревного соку. Також, зважаючи на специфіку предмета та мети дослідження, автором була опрацьована та запропонована низка методів та підходів, які вперше були використані для дослідження деревних насаджень, а саме: метод встановлення залежностей впливу негативних факторів оточуючого середовища на санітарний стан дерева шляхом застосування планування багатofакторного експерименту, метод визначення санітарного стану деревних насаджень шляхом застосування нечіткої логіки, метод прогнозування терміну життєвого циклу дерева в залежності від зміни



якісних показників деревного соку. В даному підрозділі проводиться детальний огляд цих методів та методик.

## 2.2.1 Розроблення та апробація методик експериментальних досліджень

### 2.2.1.1 Визначення показників $pH$ та солоності ґрунту в зоні кореневого живлення дерева

Водневий показник ґрунту є одним з трьох показників впливу навколишнього середовища на стан деревних насаджень. Аналіз ґрунту проводився для 27 обраних зразків соснових дерев, віком 60 – 70 років, поділених на 6 груп в залежності від категорії санітарного стану [26].



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд приладу для визначення рівню  $pH$  ЕТР-303:  
1 – аналоговий індикатор кислотності; 2 – перемикач режимів роботи приладу; 3 – вимірювальні електроди

Класична методика проведення вимірювання рівню  $pH$  з використанням електронно-цифрового приладу ЕТР-303 (рис. 2.2) описана у [99].

Для виконання вимірювань рівню  $pH$  має бути врахована низка чинників, що обумовлені особливостями об'єкту вимірювань. В нашому випадку, зокрема, для сосни звичайної мають бути враховані особливості

залягання та розвитку кореневої системи, тому для вимірювань у зоні кореневого живлення дерева класична методика була уточнена та конкретизована. А саме для отримання адекватних та коректних результатів вимірювання рівню рН встановлені рекомендовані значення щодо дотримання при вимірюваннях відстані від ствола та глибини занурення електродів, оптимального ступеня вологості ґрунту, часу для адаптації приладу в умовах польових вимірювань за різних погодних умов, кількості циклів вимірювання.

Отже, для визначення показників рН була запропонована та впроваджена наступна авторська методика:

1. Сенсори *ph*-метру ЕТР-303 занурюються в ґрунт на відстані 100 мм від ствола дерева. При цьому датчик занурювався в поверхневий шар ґрунту на глибину залягання коріння, що становила 100 – 150 мм. Слід зауважити, що ґрунт, вимірювання *pH* якого проводилося, має бути достатньо вологим, але не рідким (відносна вологість – не менша за 80%). Грудки ґрунту не мають розсипатися при їх терті, проте на цупкій паперовій серветці не має залишатися рідинний слід від ґрунту. Якщо ґрунт сухий – його попередньо змочують, доводячи до необхідного рівня вологості дистильованою водою.

2. Після адаптації пристрою до вимірювального середовища (близько 1 хв.) за відхиленням стрілки пристрою на аналоговому індикаторі визначаються показання *pH*.

3. Процедура повторюється для кожного дерева із досліджуваної партії дерев не менше 3 разів (раціонально – з різних сторін дерева). Перед кожним повторним вимірюванням, вимірювальні електроди ретельно протираються паперовою серветкою від залишків ґрунту та вологи.

Певірка приладу проводилась за класичною методикою за еталонними зразками окремо перед кожним циклом вимірювань [101].

Вимірювання солоності проводилось з використанням спеціального електронного пристрою ЕС-метр моделі DIST-3, рис.2.3 [100].



Рис.2.3 – Зовнішній вигляд приладу для визначення солоності ЕС-метр:  
1 – електронний індикатор солоності (ppm); 2 – вимірювальні електроди

Аналогічно до попереднього випадку класична методика [100] проведення вимірювання солоності за допомогою ЕС-метру була конкретизована в зв'язку з особливостями об'єкту вимірювань. В нашому випадку, зокрема, для сосни звичайної були враховані особливості залягання та розвитку кореневої системи, тому були встановлені рекомендації щодо місць забору ґрунту для аналізу (відстань від досліджуваного дерева та глибина забору ґрунту) та обсягів ґрунту, що використовувався для аналізу.

Зокрема, зразки поверхневого шару ґрунту для аналізу бралися на відстані 100 мм від досліджуваного дерева на глибині порядку 100 – 150 мм.

Послідовність проведення досліджень була встановлена наступна:

1. Готується дослідний зразок – розчин ґрунту в дистильованій воді у пропорції 1:1. Для цього береться зразок ґрунту 10 г та розчиняється у 10 мл дистильованої води.

2. Вмикається вимірювальний пристрій та занурюється вимірювальними електродами у розчин.

3. Показання приладу знімаються, після завершення часу адаптації (близько 1 хв.) та фіксації припинення змін значень.

4. Перед повторним вимірюванням значення обнуляються, ємність для розчину ретельно очищується від залишків розчину паперовими серветками.

Для приготування нового ґрунтового розчину використовується нові порції ґрунту та дистильованої води.

Повірка приладу проводилась за класичною методикою за еталонними зразками окремо перед кожним циклом вимірювань [100].

### **2.2.1.2 Дослідження впливу зміни кислотності та солоності ґрунтів на санітарний стан дерева**

Водневий показник, або показник кислотності ( $pH$ ) ґрунтів впливає на процес засвоєння рослинами поживних речовин (живлення рослин), а також на швидкість росту та розвиток кореневої системи рослини [101].

Ґрунт з надмірною кислотністю погіршує діяльність корисних мікроорганізмів. Зокрема збільшення рівня водневого показника впливає на процес збагачення корисними мікроелементами ґрунтів, що в свою чергу не задовольняє потреби рослини в корисних речовинах.

В протилежному випадку, за умови низького рівня кислотності, для живлення рослини майже не доступні такі елементи, як: бор, фосфор, мідь, залізу, цинк, марганець та багато інших. Також спостерігається порушення процесу засвоєння у зв'язку з тим, що утворюються сполуки нерозчинних гідрооксидів, які в явному вигляді не можуть поглинатися рослинами.

Наприклад, дослідження впливу кислотності ґрунту на продуктивність та загальний фізичний стан рослин проведені в роботі [102] на основі урожаю пшениці показав зміну хімічного складу ґрунту (рис. 2.4).

Окрім кислотності на розвиток деревних насаджень суттєво впливає і солоність ґрунту. Поступове накопичення солі в ґрунті призводить до гальмування процесу поглинання рослиною води. В результаті збільшення кількості іонів натрію та хлору в ґрунті призводить до зміни будови хлоропластів. Виникають порушення в транспортуванні поживних речовин до клітин. Великий рівень засоленості призводить до пошкодження поверхневих шарів кореневої системи, та спостерігається порушення росту та

розвитку рослин [102]. При цьому рослина може загинути від нестачі води, навіть, у абсолютно вологому, проте солоному ґрунті. З іншого боку – зростання у знесолоному ґрунті веде до пригнічення рослин внаслідок нестачі споживчих речовин (іонів, з'єднань мікроелементів та інш.), що приймають участь у іонно-транспортному обміні між клітинами речовини.

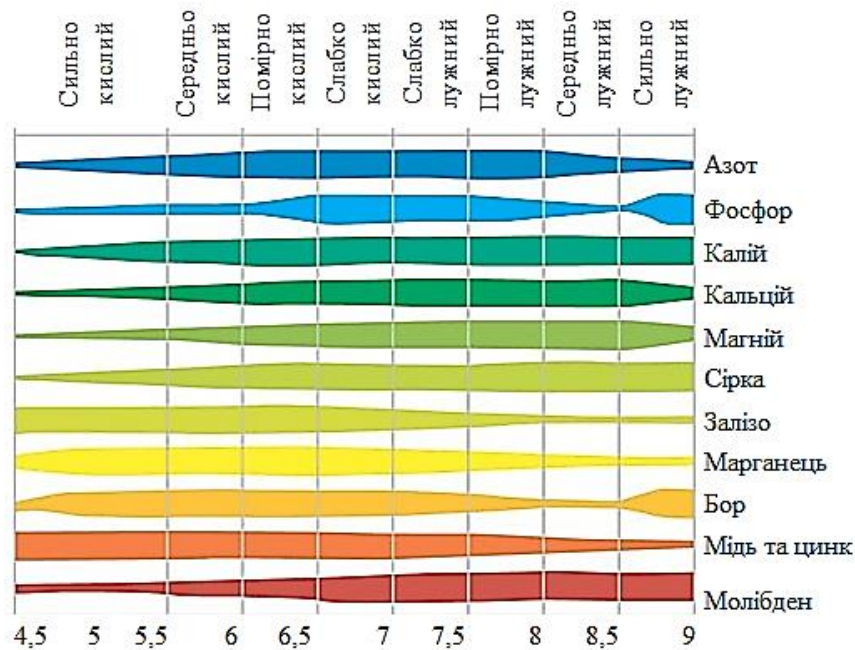


Рис. 2.4. Зміна хімічного складу ґрунту в залежності від кислотності ґрунту (товщина лінії відповідного кольору вказує на пропорційне зменшення / збільшення масової частки відповідного елементу за даного показника кислотності) [102]

Для обраного об'єкту дослідження – сосни звичайної, нормальними показниками кислотності та солоності ґрунтів є такі [103]:  $pH$  на рівні 6 – 6,5, солоність – на рівні 450 – 650 ppm. При цьому, діапазон цих параметрів, визначених за вищенаведеною методикою (див. п.2.2.1.1) на території паркової зони «Спортивний» (м. Черкаси) становив наступні значення:  $pH = 4,5 - 7,5$ , солоність – 400 – 970 ppm.

### 2.2.1.3 Експрес-визначення якісних показників деревного соку

Загалом до основних якісних показників деревного соку відносяться його: водневий показник ( $pH$ ), показник цукровості та в'язкість.

Для експрес-визначення рівня  $pH$ , зазвичай, використовуються спеціальні лакмусові смужки [102]. Автором вперше запропоновано використання зазначених смужок для визначення рівня  $pH$  деревного соку. В зв'язку з чим розроблена така послідовність визначення рівня  $pH$  деревного соку за допомогою спеціальних лакмусових смужок:

1. Готується деревний сік шляхом змішування його з розчинником (для нашого випадку в якості розчинника використовувався етиловий спирт 96%), в якому сік розчиняється до утворення консистенції, як у соняшникової олії (співвідношення між кількістю смоли сосни та спирту становить 1 : 2,2 – 3,5).

2. Лакмусова смужка зволожується деревним соком та сушиться декілька хвилин.

3. Після того, як лакмусова смужка остаточно змінить колір, визначається кислотність розчину, шляхом порівняння коліру на лакмусовій смужці з колірною шкалою (зазвичай, наведена на упаковці).

4. Проводиться корегування  $pH$  деревного соку шляхом порівняння тест-розчину з досліджуваним розчином. Так, в якості тест-розчину виступав 0,1 н розчин лимонної кислоти ( $pH = 2,2$ ). Далі, тест-розчин розбавлявся в етиловому спирту (96%) у пропорції робочого розчину (1 : 2,2 – 3,5), для якого повторно визначався  $pH$ . Коефіцієнтом, що дорівнює відношенню початкового значення  $pH$  (2,2) до отриманого значення  $pH$  тест-розчину відбувалося корегування кислотності досліджуваного зразка (наприклад, для робочого розчину при співвідношенні між кількістю смоли сосни та спирту 1 : 2,5 значення  $pH$  становило 4,3, тоді, як для тест-розчину – це значення складало 6,2. Знайшовши коефіцієнт корегування  $k_{pH} = (6,2 - 2,2) / 6,2 = 0,645$

визначимо остаточне значення  $pH$  зразка деревного соку (смоли сосни звичайної), як  $4,3/0,645 = 6,67$ ).

Для експрес-визначення цукровості деревного соку використовувалися спеціальні індикаторні тест-смужки для визначення рівня цукру в крові [104].

Автором запропонована така послідовність визначення рівня цукру деревного соку за допомогою індикаторних тест-смужок:

1. Спеціальна тест-смужка розташовується на сухій поверхні зоною індикації догори.

2. Обережно на індикаторну зону тест-смужки наноситься розчин деревного соку підготовлений попередньо для визначення  $pH$ .

3. Після проведення реакції між речовиною тест-смужки та розчином (приблизно 1-2 хв.) залишки деревного соку видаляються з тест-смужки шляхом розміщення її під струменем холодної та чистої води.

4. Видаляються залишки води з тест-смужки за допомогою паперової серветки.

5. Цукровість деревного соку визначається шляхом порівняння відтінку та яскравості кольору на тест-смужці з колірною шкалою (зазвичай, приведена на упаковці).

6. Проводиться корегування цукровості деревного соку шляхом порівняння тест-розчину з досліджуваним розчином. Так, в якості тест-розчину виступав розчин сахарози взятий в пропорції до дистильованої води 1 мл сахарози до 1 л дист. води, цукровість якого становила 1 ppm. Далі, тест-розчин розбавлявся етиловим спиртом (96%) у пропорції робочого розчину (1 : 2,2 – 3,5), для якого повторно визначалася цукровість. Коефіцієнтом, що дорівнює відношенню початкового значення цукровості (1 ppm) до отриманого значення цукровості тест-розчину відбувалося корегування цукровості досліджуваного зразка (наприклад, для робочого розчину при співвідношенні між кількістю смоли сосни та спирту 1 : 2,5 значення цукровості становило 1,1 ppm, тоді, як для тест-розчину – це значення складало 0,15 ppm. Знайшовши коефіцієнт корегування  $k_{Sug} = 1 / 0,15 = 6,67$

визначимо остаточне значення цукровості зразка деревного соку (смоли сосни звичайної), як  $1,1 \cdot 6,67 = 7,34$  ppm).

Запропонований вище підхід до визначення показників  $pH$  та цукровості деревного соку з використанням робочих та еталонних розчинів і з подальшим корегуванням було запропоновано вперше. Адекватність та коректність його застосування було підтверджено традиційними методами іонометрії та оптичної рефрактометрії на повірених приладах (іонометр моделі ADWA AD1030 (дата повірки 13.03.2020) (відносна похибка визначення водневого показника  $\pm 0,01$  pH) та рефрактометрі моделі УРЛ-1 (дата повірки 28.01.2020) (відносна похибка визначення цукровості по сахарозі для твердих речовин – 0,1%). При цьому розбіжність між експериментально отриманими даними за запропонованою автором роботи методикою та результатами, отриманими методами іонометрії та оптичної рефрактометрії не перевищувала 3,5 – 8,1% для окремих груп зразків.

Враховуючи лінійний характер залежностей  $pH$  та цукровості спиртових розчинів для більшості різновидів цукрів можна вважати запропоновані вище підходи до експериментального визначення показників  $pH$  та загальної цукровості деревного соку коректними.

Для визначення в'язкості деревного соку використовувався капілярний віскозиметр Оствальда–Пінкевича. Послідовність визначення в'язкості деревного соку [103]:

1. Досліджуваний розчин деревного соку заливається в ліве коліно капілярного віскозиметра.

2. За допомогою секундоміру відмічається час, за який сік стікає через капіляр, при визначеному об'ємі рідини та через спеціальний вимірювальний резервуар.

3. Оскільки рідина витікає внаслідок різниці рівнів у колінах віскозиметра (що є однаковою в дослідах з різними рідинами), то замість відношення тисків, під якими витікають рідини, беремо відношення їхньої густини:  $\Delta p_2 / \Delta p_1 = \rho_2 / \rho_1$ .



4. Тоді формула для визначення коефіцієнта в'язкості рідин відносним методом за допомогою віскозиметра Оствальда–Пінкевича буде:  $v_2 = v_1 t_2 / t_1$ , де  $v_1$  та  $v_2$  – коефіцієнти кінематичної в'язкості досліджуваної та відомої рідини (етанолового спирту), відповідно;  $t_1$ ,  $t_2$  – час витікання відповідної рідини. Отже, капілярним віскозиметром Оствальда–Пінкевича безпосередньо вимірюється кінематична в'язкість рідини.

5. Для забезпечення сталої температури в дослідах, віскозиметр розташовується у термостаті. Густина досліджуваної рідини визначалася пікнометром.

## **2.2.2 Розроблення та випробовування розрахункових методів та методик оброблення результатів експерименту**

### **2.2.2.1 Встановлення впливу факторів оточуючого середовища на санітарний стан дерева методом планування багатofакторного експерименту**

Гіпотеза про необхідність прийняття певного уявлення про поверхню реакції процесу впливу чинників, є основою методу планування багатofакторного експерименту (БФЕ). Цей процес загалом можна аналітично записати у вигляді (2.1) [105]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i), \quad (2.1)$$

де  $y$  – реакція процесу, параметр, який вивчається та оптимізується,  $x_1 - x_i$  – прогнозовані показники, які змінюються в залежності від постановки експерименту.

Визначення фактичних значень  $y$  та  $x$  відбувається при проведенні досліджень, і є відомими на етапі планування БФЕ. Однак вигляд функцій зв'язку (моделі) до початку дослідження є невідомим, тому має бути виведений в процесі проведення досліджень. Тому будемо вважати, що на значення  $y$ , впливають не лише значення  $x_1 \dots x_i$ , а й неконтрольовані

чинники, наприклад: похибка експерименту; фактори зміни параметрів навколишнього середовища (температура, вологість й інше). Це призводить до того, що функція  $y = f(x_1, x_2, \dots, x)$  буде поводитися випадковим чином, навіть за умови фіксованих значень  $x$ . З цього виходить необхідність знаходження дисперсії (або довірчих інтервалів) та математичного очікування.

В зв'язку з тим, що наперед не відомий вид функцій  $y$ , його обирають у вигляді частини поліному. Визначення рівняння функції залежить від необхідної точності, а також від передбачуваного характеру залежності.

Вигляд функції математичного очікування представлений у формулі:

$$M(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots \quad (2.2)$$

В такому випадку коефіцієнти регресії можна знайти за наступними формулами:

$$\beta_1 = \frac{\partial f}{\partial x_1}; \quad \beta_2 = \frac{\partial f}{\partial x_2}; \quad \beta_{12} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}; \quad \beta_{11} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}; \quad \beta_{22} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}; \quad \dots, \quad (2.3)$$

Підбір виду функції  $y$  (частини поліному) з можливістю оцінки коефіцієнтів регресії в майбутньому є основним завданням проведення регресійного аналізу. Вид функції має бути максимально спрощений, при цьому необхідно, щоб він корелював з реальною залежністю.

В рамках досліджуваної моделі можемо обмежитись трьома чинниками (температура оточуючого середовища, показники  $pH$  та солоності ґрунту) та одним відгуком з трьох показників якості деревного соку, за якими визначається категорія санітарного стану деревних насаджень. Для спрощення множинна регресія з трьома предикторними змінними зводиться до поліноміальної регресії.

Відносно кожної стадії чинника  $x_i$  визначається рівняння регресії (2.4), яке відображає певну залежність від змінної  $x_i$  відгуку  $y$ .

$$y = \beta_{0i} + \beta_{1i} \cdot x_i + \beta_{2i} \cdot x_i^2. \quad (2.4)$$

Приймаються наступні допущення для більшого спрощення методів пошуку коефіцієнтів регресії.

1. Результати  $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ , де  $n$  – загальна кількість спостережень за відгуком  $y$ , приймаються незалежними одна від одної випадковими величинами, при цьому нормально розподіленими.

2. Дисперсії  $D(y_i)$  рівні між собою або ж пропорційні завчасно відомій функції  $\Phi(y)$ .

3. Змінні значення  $x_1 \dots x_i$  приймаються незалежними один від одного та похибки, впливом якої можна знехтувати в порівнянні зі значенням  $\sigma[y_i]$ .

Для знаходження коефіцієнтів регресії застосовується матричний метод, при чому результати експериментальних досліджень представляються у вигляді двох матриць  $Y$  та  $X$ .

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} \\ x_{03} & x_{12} & x_{23} \end{pmatrix}$$

Після чого на матриці  $Y$  та  $X$  множиться транспонована матриця  $X^*$ . За результатом добутку  $X^*X$  розраховується зворотна матриця, яка перемножується на добуток  $X^*Y$ . Матриця  $T$  отримується в наслідок розрахунку виразу (2.5), коефіцієнти ж  $\beta_i$  (2.4) визначаються за формулою (2.6):

$$T = (X^*X)^{-1}(X^*Y) = \begin{pmatrix} c_{00}(0y) & c_{01}(1y) & c_{02}(2y) \\ c_{10}(0y) & c_{11}(1y) & c_{12}(2y) \\ c_{20}(0y) & c_{21}(1y) & c_{22}(2y) \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$\beta_i = \sum_{j=0}^k c_{ij}(jy), \quad (2.6)$$

де  $c_{ij}(ij)$  – елементи матриці  $T$  (2.5).

Внаслідок проведених математичних операцій отримуються три рівняння залежності відгуку  $y$  від фактору  $x_i$ . Використання цієї залежності

не відповідає необхідним вимогам точності, тому для збільшення точності необхідно введення нової змінної. Це забезпечується пошуком залежності коефіцієнтів  $\beta_i$  від змінної  $x_{i+1}$ :

$$\beta_i = a_{0i} + a_{1i} \cdot x_{i+1} + a_{2i} \cdot x_{i+1}^2 + a_{3i} \cdot x_{i+1}^3 \quad (2.7)$$

Визначається окремо для кожного з трьох рівнянь.

Аналогічний підхід застосовується для обрахунку коефіцієнтів. Є матриця  $X'$  та матриця  $Y'$ :

$$X' = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} \\ x_{03} & x_{13} & x_{23} \end{pmatrix}; \quad Y' = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}.$$

Залежність коефіцієнтів  $\beta_{ji}$  від  $x_{i+1}$  визначається шляхом отримання систем трьох рівнянь при аналогічних обрахунках. Підстановкою отриманих рівнянь в формулу (2.4) отримуємо:

$$y = (a_{01} + a_{11} \cdot x_1 + a_{21} \cdot x_1^2) + (a_{02} + a_{12} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_1^2) \cdot x_2 + \\ + (a_{03} + a_{13} \cdot x_1 + a_{23} \cdot x_1^2) \cdot x_2^2$$

Відкриваємо дужки та отримуємо наступний вираз:

$$y = a_{01} + a_{11} \cdot x_1 + a_{21} \cdot x_1^2 + a_{02} \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{22} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + \\ + a_{03} \cdot x_2^2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + a_{23} \cdot x_1^2 \cdot x_2^2$$

Статистичний аналіз виконується після обчислення коефіцієнтів рівняння регресії. В першу чергу робиться оцінка точності утвореної моделі процесу, визначається залишкова дисперсія для перевірки гіпотези адекватності моделі. Дисперсія адекватності  $S_{ad}^2$  характеризує розсіяння емпіричних значень в залежності від розрахункових:

$$S_{ad}^2 = \frac{s_R}{f_R}, \quad (2.8)$$

де  $s_R$  – залишкова сума квадратів,  $f_R = N - (k + 1)$  – число ступенів свободи.

Розраховується залишкова сума квадратів:

$$s_R = \sum_{u=1}^N y_u^2 - \sum_{i=0}^k b_i \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u. \quad (2.9)$$

Розрахунок дисперсії відтворюваності експерименту ( $F$ -критерій Фішера) проводиться для перевірки гіпотези адекватності моделі:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}. \quad (2.10)$$

Модель є адекватною, якщо табличне значення  $F_m$  більше за розрахункове  $F_p$  в межах прийнятого рівня значущості.

Інтерпретація коефіцієнту детермінації  $R^2$  відбувається під час оцінки регресійних моделей та розраховується за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2.11)$$

Розрахунок дисперсії  $\hat{\sigma}_y^2$ ,  $\hat{\sigma}^2$  проводиться за формулами:

$$\sigma^2 = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2, \quad \sigma_y^2 = \sum_{t=1}^n \left( y_t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2. \quad (2.12)$$

Розрахунок дисперсії коефіцієнта регресії, проводиться для детального аналізу оцінок коефіцієнтів регресії при відсутності паралельних дослідів:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (2.13)$$

$t$ -критерій Стюдента, що застосовується для перевірки статистичної значущості коефіцієнтів регресії, визначається так:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{bi}}. \quad (2.14)$$

Порівнюється розраховане значення  $t$ -критерію з табличним при заданому рівні значущості та відповідному числі ступенів свободи. Критерій значимості відрізняється від нуля, при виконанні умови  $t_i > t_{табл}$ . З рівняння регресії необхідно виключити вибіркові коефіцієнти, для яких виконується умова  $t_i \leq t_{табл}$ .

### 2.2.2.2 Встановлення закономірностей впливу факторів оточуючого середовища на основні показники деревного соку

Для проведення експериментальних досліджень для визначення впливу кліматичних факторів були обрані соснові насадження (сосна звичайна) віком 60 – 70 років у кількості 27 шт. Це мінімальна допустима кількість об'єктів дослідження, обумовлена необхідністю визначення впливу оточуючого середовища на 6 груп, які відповідають категоріям санітарного стану деревних насаджень [26, 105].

Вимірювання проводилося в статичному режимі окремо для кожної категорії. Визначалися значення водневого показника, солоності та цукровості.

Визначення основних закономірностей впливу кліматичних факторів на категорію санітарного стану деревних насаджень здійснювалися за результатами експерименту. Оцінка адекватності впливу забезпечувалась проведенням серії експериментів. Внаслідок проведення аналізу отриманих результатів були виділені найбільш впливові фактори (табл. 2.5).

Табл. 2.5. Фактори впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на санітарний стан деревних насаджень

Фактор	Назва фактору / відгуку	Умовне позначення одиниці вимірювання	Мінімальне значення	Максимальне значення
$x_1$	Водневий показник ґрунту	$pH_g$ , у.о.	4,5	7,5
$x_2$	Солоність ґрунту	$Sol$ , ppm	400	970
$x_3$	Температура повітря	$T$ , °C	3,6	33,6
$y_1$	Водневий показник деревного соку	$pH_j$ , у.о.	3	9
$y_2$	Цукровість соку	$Sug$ , %	0	6,0
$y_3$	В'язкість соку	$V$ , мПа·с	195	370

Номинальні діапазони показників якості деревного соку (соснової смоли) для дерев I категорії становлять:

- водневий показник деревного соку,  $pH_j = 6 - 6,5$  у.о.
- цукровість соку,  $Sug = 2,8 - 5,6$  %
- в'язкість соку,  $V = 210 - 280$  мПа.с

При визначеній кількості факторів та рівнів їх варіювання для побудови регресійних моделей застосовувались робастні плани експерименту. Такі плани мають наступні переваги перед іншими [106]:

- плани не залежать від кількості рівнів варіювання, тобто їх кількість може дорівнювати кількості проведених дослідів;
- план можна використовувати для пошуку оптимального значення;
- план надає можливість збереження усіх попередньо отриманих дослідів.

Перераховані вище переваги дозволяють при невеликій кількості фактичних дослідів, підвищувати їх надійність.

Оскільки в нашому випадку не можливо забезпечити керування вхідними параметрами (температурою, водневим показником та рівнем солоності ґрунту) через їх стохастичну природу, процес планування експерименту був реалізований наступним чином. Попередньо був згенерований однорідний план в межах номінальних показників цих параметрів, а потім з множини фактично отриманих результатів фізичних вимірювань цих показників були відібрані максимально близькі до згенерованих значення.

Отримані результати представлені в табл. 2.6.

Як видно з табл. 2.6, найкращі результати показали наступні зразки:

- зразок 2 – оптимальні діапазони показника  $pH_j$  соку, його цукровості  $Sug$  та в'язкості  $V$ ;
- зразок 3 – оптимальні діапазони цукровості деревного соку  $Sug$  та його в'язкості  $V$ .

Табл. 2.6. Робоча матриця експерименту та результати фізичних вимірювань

№ екперименту	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	4,5	688	26,1	8,5	0,44	301
2	7,1	543	18,6	6,0	4,6	244
3	6,8	472	14,85	5,9	4,9	224
4	7,5	398	29,85	5,2	2,5	329
5	4,8	899	11,1	5,6	0,36	220
6	6,0	967	22,35	6,4	0,74	281
7	6,3	756	3,6	5,5	2,2	195
8	5,8	483	32,3	8,1	0,26	363
9	5,15	815	7,35	5,8	1,4	208

Отримання математичних моделей відбувалося за допомогою програмного засобу PRIAM [106 – 110].

Загальне рівняння регресії (2.15):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (2.15)$$

Після обробки результатів експериментальних досліджень побудовано математичні регресійні моделі, які описують залежності основних характеристик (водневого показника  $pH_j$ , цукровості  $Sug$ , в'язкості  $V$ ) деревного соку від зовнішніх кліматичних факторів (Додаток Б) [108]:

– для визначення оптимального діапазону водневого показника  $pH_j$  деревного соку:

$$pH_j = 7,39 + 0,43x_1 + 0,00367x_2 - 0,16x_3 - 0,1x_1^2 - 10^{-5}x_2^2 + 3,8 \cdot 10^{-3}x_3^2 + 6 \cdot 10^{-4}x_1x_2 - 0,015x_1x_3 + 2,8 \cdot 10^{-4}x_2x_3, \quad (2.16)$$

– для визначення оптимального діапазону цукровості  $Sug$  деревного соку:

$$Sug = 8 - 0,45x_1 - 0,005x_2 - 0,16x_3 - 0,0011x_1^2 - 9 \cdot 10^{-6}x_2^2 - 0,008x_3^2 + 0,00111x_1x_2 + 0,03x_1x_3 + 2,7 \cdot 10^{-4}x_2x_3, \quad (2.17)$$

– для визначення оптимального діапазону в'язкості  $V$  деревного соку:



$$V = 200 - 0,96x_1 - 0,009x_2 - 0,279x_3 - 0,1952x_1^2 + 1,9 \cdot 10^{-5}x_2^2 + 0,16195x_3^2 + 0,00173x_1x_2 + 0,0576x_1x_3 - 5,2 \cdot 10^{-4}x_2x_3, \quad (2.18)$$

Тут,  $x_1$  – водневий показник ґрунту  $pH_g$ ;  $x_2$  – показник солоності ґрунту  $Sol$ ;  $x_3$  – температура повітря  $T$ ;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – коефіцієнти регресії.

Залежності впливу зовнішніх кліматичних факторів (солоності та  $pH$  ґрунту, температура оточуючого середовища) на якісні показники деревного соку (рис. 2.5 – 2.7) за умови сталих значень показника солоності ґрунту (1 –  $Sol = 505$  ppm; 2 –  $Sol = 823$  ppm).

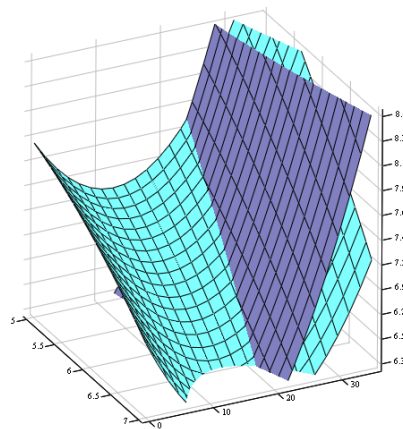
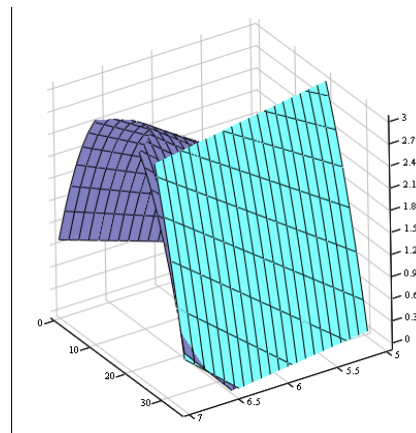


Рис. 2.5. Залежність впливу температури оточуючого середовища,  $pH$  та солоності ґрунту на рівень показника  $pH$  деревного соку



Y1, Y2

Рис. 2.6. Залежність впливу температури оточуючого середовища, показника  $pH$  та солоності ґрунту на в'язкість деревного соку

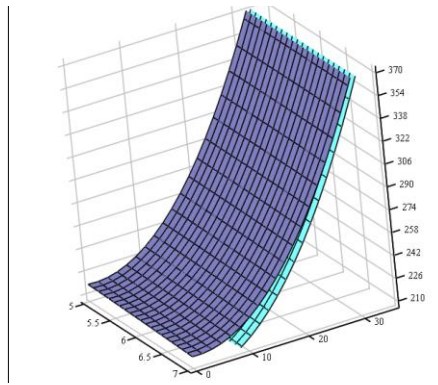


Рис. 2.7. Залежність впливу температури оточуючого середовища, показника  $pH$  та солоності ґрунту на цукровість деревного соку

Отримані залежності були перевірені на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики [105].

В результаті встановлено, що усі моделі інформативні ( $Fr_{розр} > Fr_{кр}$ ,  $t \geq 2$ ), адекватні ( $F_{розр} > F_{кр}$ ) та стійкі (cond близьке до 1).

Гіпотези перевірялися при рівні значимості  $\alpha = 0,05$ .

Адекватність без повторних дослідів перевіряли за методикою представленою в роботі [116].

Апроксимаційні властивості виявилися задовільними. Результати статистичного аналізу представлені в табл. 2.7.

Табл. 2.7. Статистичні характеристики моделей

Характеристики		Модель		
		$y_1$	$y_2$	$y_3$
Інформативність	$R^2$	0,855	0,81	0,87
	$Fr$ розрахункове	12,76	41,37	17,4
	$Fr$ критичне	9,28	9,28	9,28
	$\gamma$ -критерій Бокса-Веца	2	2	2
Адекватність	$F$ розрахункове	5,69	8,53	13,38
	$F$ критичне	4,76	4,76	4,76
Стійкість	Число обумовленості (cond)	1,02	1,01	1,01
Описові властивості	Похибка апроксимації (%)	1,07	2,30	3,99

### 2.2.2.3 Визначення санітарного стану деревних насаджень методом нечіткої логіки

Реалізація процесу визначення СС ДН буде здійснюватися з використанням методів нечіткої логіки в системі підтримки прийняття рішень за допомогою застосування спеціалізованого додатку Fuzzy Logic Toolbox математичного процесору MatLab.

В процесі розроблення моделі використовуються такі графо-аналітичні засоби, що входять у додаток нечіткого виведення Fuzzy Logic Toolbox:

- редактор системи (FIS-редактор);
- редактор функцій належності (Membership Function Editor - MFE);
- редактор правил (Rule Editor - RE);
- програма перегляду правил (Rule Viewer - RV);
- програма перегляду поверхні (Surface Viewer - SV).

Редактор FIS є основним засобом, що дозволяє створювати та редагувати на високому рівні системи нечіткого виведення у графічному режимі, а також їх властивості (кількість вхідних/вихідних параметрів, тип системи нечіткого виведення, метод дефазифікації майбутньої моделі). Запускається редактор за допомогою функції *fuzzy*, що вводиться у командному рядку.

У розроблюваній динамічній моделі використовується механізм нечіткого виведення за Мамдані та центроїдний метод дефазифікації. Вікно графічного інтерфейсу FIS із введеними заданими початковими параметрами моделі зображено на рис. 2.8.

Розглянемо докладніше особливості створення функції належності на прикладі вхідного параметру – температури оточуючого середовища ( $T$ ). Нехай максимальне значення температури позначимо за 1, тоді середнє її значення відповідно  $0,5 \cdot T_{max} - 0,5$ . У вікні *Range* вводиться діапазон зміни параметру  $[0; 1]$ . У вікні *Type* обирається бажаний тип функції належності (у

даному разі *gaussmf* – нормальний розподіл). У полі *Membership function plots* обирається відповідна функція належності.

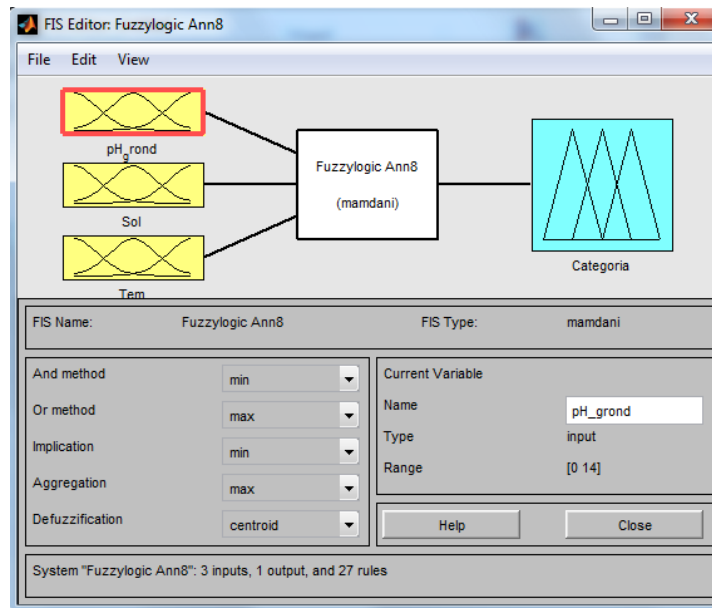


Рис. 2.8. Вигляд графічного інтерфейсу редактора FIS із заданими початковими значеннями параметрів моделі коригування точності

Аналогічні дії виконуються і для двох інших параметрів моделі. Інтерфейс редактора функції належності вхідного параметру навколишньої температури має такий вигляд (рис. 2.9).

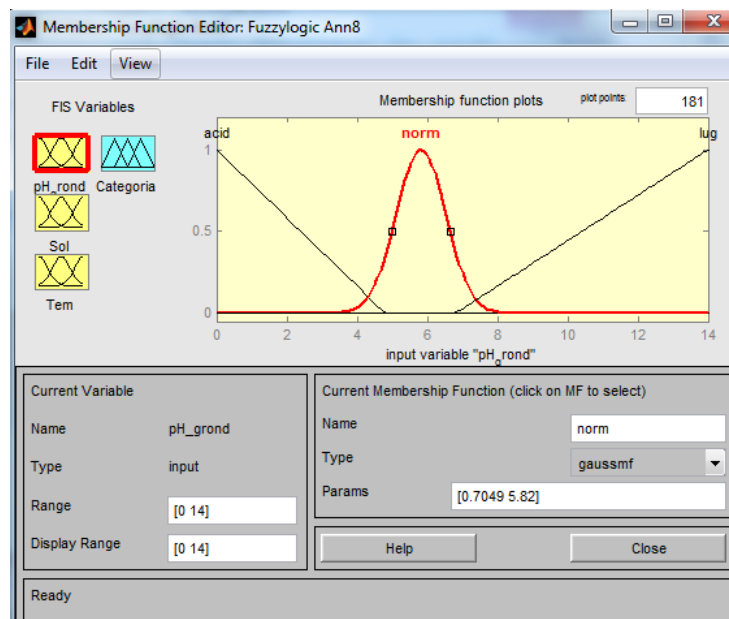


Рис. 2.9. Вікно редактора функції належності вхідного параметру «температура оточуючого середовища»

На етапі формування бази правил, необхідно скористатися результатами розв’язання рівнянь регресії (2.16) – (2.18), отриманих методом планування багатофакторного експерименту (див. п.2.2.2.2). Підставляючи в рівняння регресії (2.16) – (2.18) мінімальні, середні та максимальні значення відповідних чинників (температури оточуючого середовища, показників кислотності та солоності ґрунту) оцінюють відповідні значення показників якості деревного соку (водневий показник, цукровість та в’язкість), за якими встановлюють наближення санітарного стану дерева до вищої (1, 2), середньої (3, 4) та нижчої (5, 6) категорій якості.

На рис. 2.10 зображено інтерфейс редактора бази правил після введення усіх 27 правил (в кінці кожного правила в дужках вказані їх вагові коефіцієнти, за замовченням – приймаємо вагу кожного правила таку, що дорівнює одиниці).

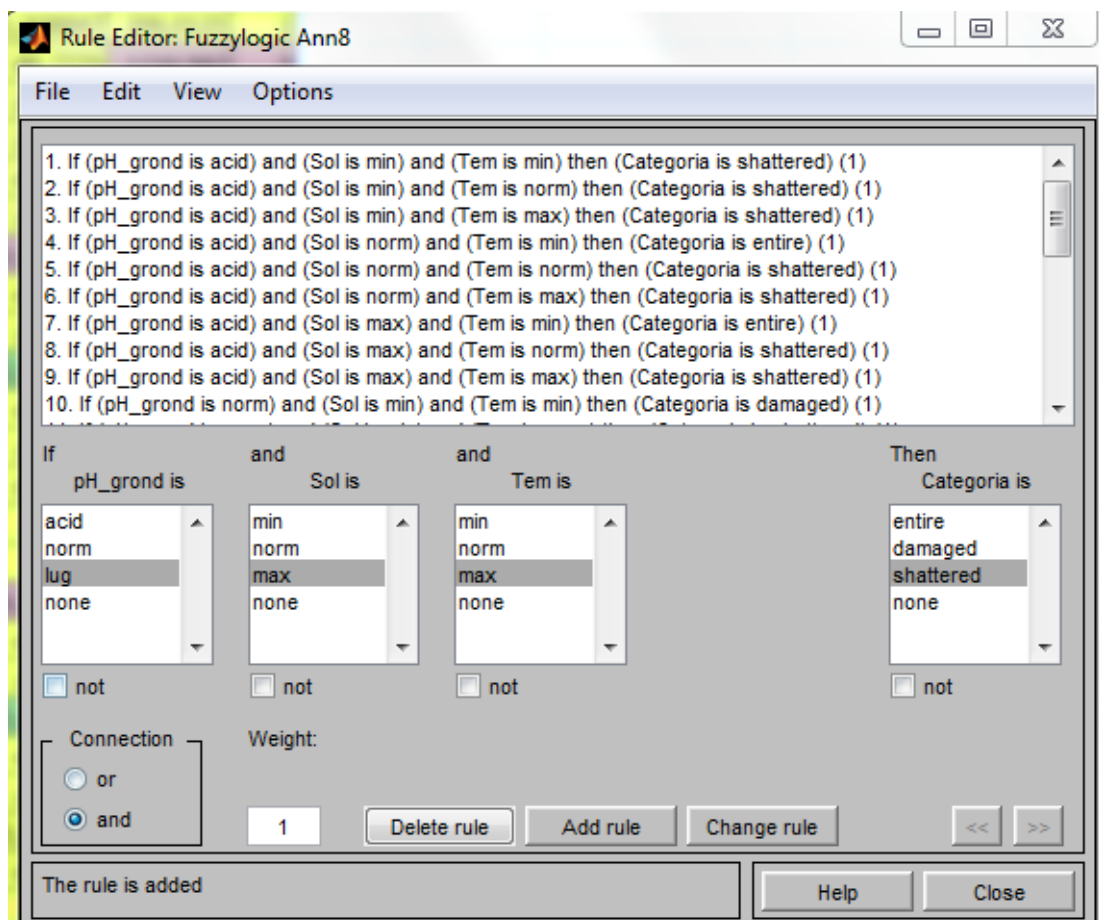


Рис. 2.10. Нечітка база правил в *Rule Editor*

Вікно програми RV правил наведено на рис. 2.11.

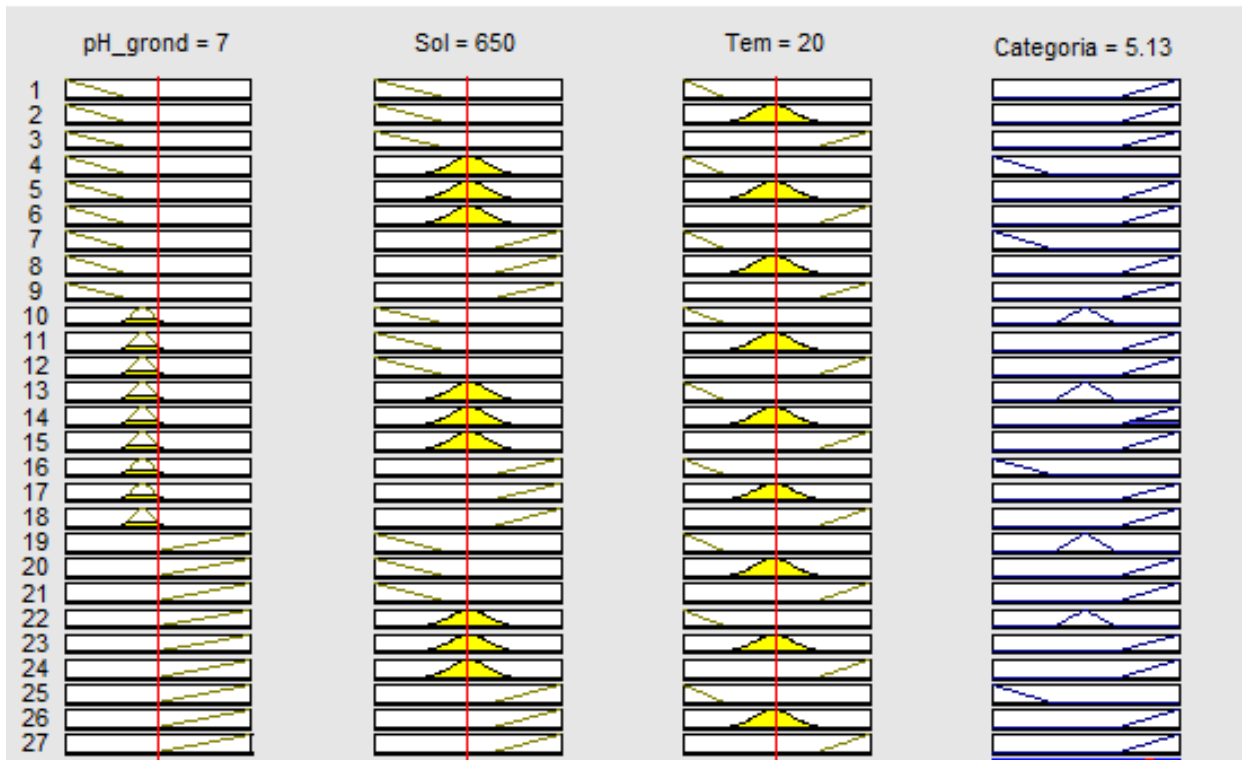
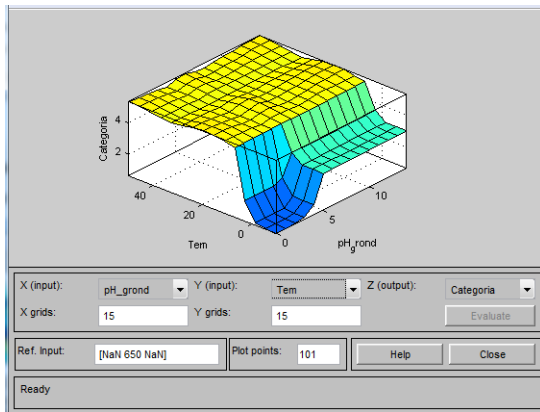


Рис. 2.11. Вікно перегляду правил системи нечіткого виведення

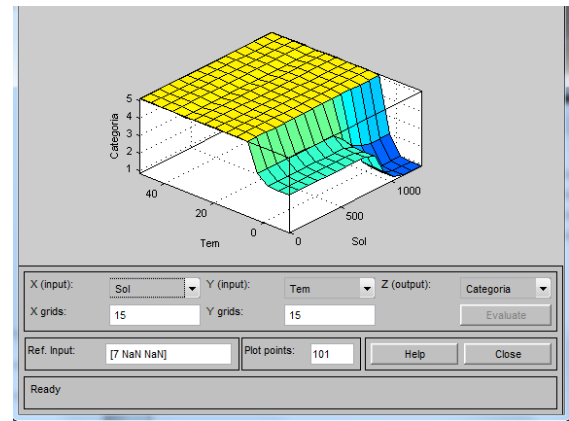
На рис. 2.11 зображено ситуацію, коли температура становить  $0,5 \cdot T_{max}$ , показники кислотності та солоності ґрунту – половина від максимального значення, точність проведених вимірювань – 50%. Звідси отримуємо значення вихідного параметру – санітарний стан дерева, що становить 5,13 бали.

Скрін програми SV системи нечіткого виведення у залежності від негативних факторів оточуючого середовища наведено на рис. 2.12.

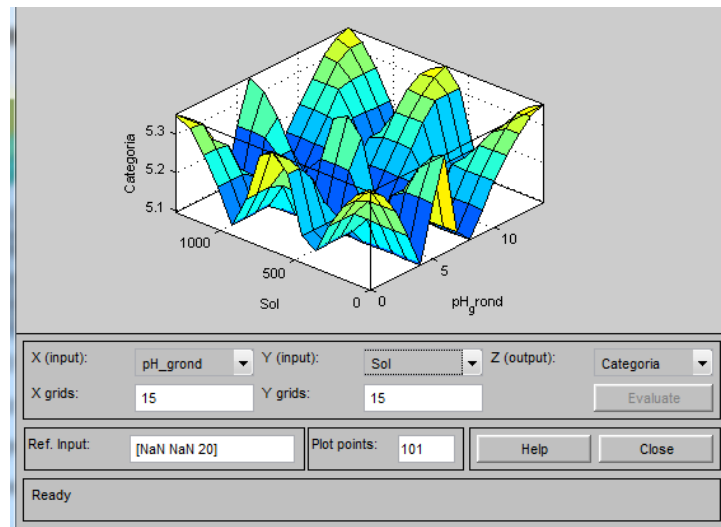
Таким чином, розроблена динамічна модель (Додаток В), що використовує механізм нечіткого виведення за Мамдані та центроїдний метод дефазифікації, а також результати розв'язання рівнянь регресії, отриманих методом планування багатофакторного експерименту для формування бази правил моделі, дозволяє з високою точністю (відносна похибка не перевищила 2 – 3%) визначати СС ДН і алгоритм якої (моделі) ліг в основу системи підтримки прийняття рішень ІВС дистанційного моніторингу СС ДН.



а.



б.



в.

Рис. 2.12. Поверхня відгуку у залежності від СС ДН: а – при показнику кислотності та температури оточуючого середовища; б – при показнику солоності та температури оточуючого середовища; в – при показнику кислотності та солоності ґрунту

#### 2.2.2.4 Прогнозування терміну життєвого циклу дерева від зміни основних показників деревного соку

В основу методу прогнозування терміну життєвого циклу дерева від якісних показників деревного соку закладено наступний підхід.

1. Проводиться аналіз графіків залежності значень водневого показника  $pH$ , сахаристості та в'язкості соку від температури повітря, рівня показника  $pH$  та солоності ґрунту з метою коректного вибору апроксимуючої

функції, яка відповідатиме одному із законів експоненціальному, параболічному, лінійному чи гіперболічному. Для розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії в таблиці 2.8 обираються найближчі за видом графіки та відповідні ним формули апроксимуючих функцій.

Окремо для кожного контрольованого параметру розраховуються коефіцієнти регресії, після чого проводиться розрахунок часу до перетину графіку з нижньою або верхньою межею параметру за формулами (2.19) – (2.22).

Коефіцієнти рівняння регресії обчислюються для кожного контрольованого параметра.

Далі визначається час до перетину графіку з верхньої або нижньої границею параметру за формулами [111, 112]:

- для експоненціальної апроксимації: 
$$t_i = \ln \frac{x_{ni}^{ni} - b}{a}, i = 1, \dots, N_x, \quad (2.19)$$

- для параболічної апроксимації: 
$$t_i = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - x_{ni}^{ni})}}{2a}, i = 1, \dots, N_x; \quad (2.20)$$

- для лінійної апроксимації: 
$$t_i = \frac{x_{ni}^{ni} - b}{a}, i = 1, \dots, N_x; \quad (2.21)$$

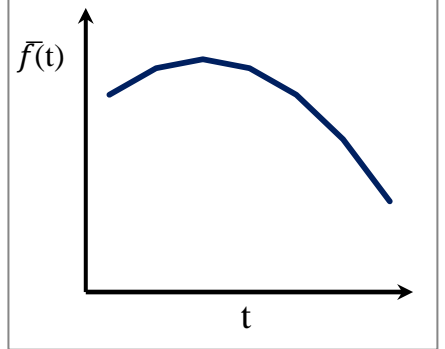
- для гіперболічної апроксимації: 
$$t_i = \frac{a}{x_{ni}^{ni} - b}, i = 1, \dots, N_x; \quad (2.22)$$

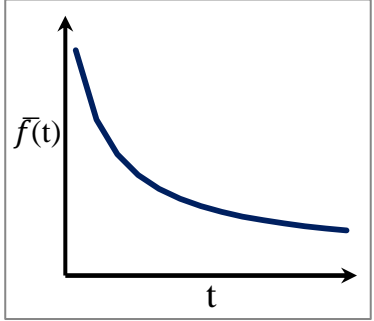
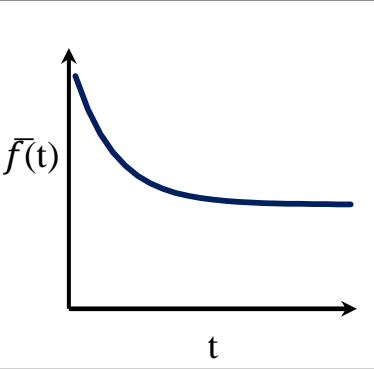
де  $x_{ni}^{ni}$  – граничні значення параметру;  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти в рівняннях регресії;  $N_x$  – число параметрів, що контролюються;  $c$  – коефіцієнт в параболічному рівнянні регресії.

Верхнє або нижнє граничне значення параметра обирається виходячи з умови, згідно з яким отриманий час має бути позитивним.



Табл. 2.8. Апроксимуючі функції, їх графіки та формули для обчислення постійних коефіцієнтів

Назва закону	Функції	Формули для визначення постійних коефіцієнтів	Графіки
1	2	3	4
Лінійний	$\bar{f}(t) = at + b$	$a = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i x_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2} ;$ $b = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n t_i x_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2} .$	
Параболічний	$\bar{f}(t) = at^2 + bt + c$	$a \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i^2 x_i ;$ $a \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i x_i ;$ $a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i + cn = \sum_{i=1}^n x_i .$	

1	2	3	4
Гіперболічний	$\bar{f}(t) = \frac{a}{t} + b$	$a = \frac{n \sum_{i=2}^n \frac{x_i}{t_i} - \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \cdot \sum_{i=2}^n x_i}{n \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i^2} - \left( \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \right)^2}$ $b = \frac{\sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i^2} \cdot \sum_{i=2}^n x_i - \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \cdot \sum_{i=2}^n \frac{x_i}{t_i}}{n \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i^2} - \left( \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \right)^2}$	
Експоненційний	$\bar{f}(t) = ae^{-t} + b$	$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i \cdot e^{-t_i} - \sum_{i=1}^n e^{-t_i} \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n e^{-2t_i} - \left( \sum_{i=1}^n e^{-t_i} \right)^2}$ $b = \frac{\sum_{i=1}^n e^{-2t_i} \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot e^{-t_i} \cdot \sum_{i=2}^n e^{-t_i}}{n \sum_{i=1}^n e^{-2t_i} - \left( \sum_{i=1}^n e^{-t_i} \right)^2}$	

Тут,  $n$  – число проведених вимірів по кожній категорії;  $t$  – час вимірювання;  $x_i$  – значення параметра в  $i$ -тій момент часу  
 $a$ ,  $b$  – коефіцієнти в рівняннях регресії;  $c$  – коефіцієнт в параболічному рівнянні регресії.

2. Обчислюється середній час (середнє арифметичне значення)  $t_{cp}$  і середньоквадратичне відхилення середнього часу  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{cp})^2}{N - 1}}, \quad (2.23)$$

де  $N$  – число контрольованих параметрів.

3. Обчислюється мінімальний час за формулою:

$$t_{\min} = t_{cp} \cdot \frac{\sigma^t}{\sqrt{N}}, \quad (2.24)$$

де  $t$  – критерій Стюдента, який залежить від довірчої ймовірності і числа вимірювань контрольованих параметрів.

Якщо мінімальний ресурс менше нуля, то найбільше значення часу відхиляється і повторюється обчислення середнього часу і мінімального терміну життя для решти значень часу, при цьому  $N$  зменшується на одиницю доти, поки мінімальний термін життєвого циклу дерева не стане вище нуля.

4. Оскільки випробування проводяться за умов прискореного старіння, коефіцієнт прискорення обчислюється за формулою:

$$K_t = \exp\left(11600 \cdot X_{cp} \frac{(X_{випр} - X_{екс})}{X_{випр} \cdot X_{екс}}\right), \quad (2.25)$$

де  $X_{cp}$  – граничне значення вимірюваної характеристики, виходячи за яке отримане значення перевищить допустиму похибку;  $X_{випр}$  – вимірювана характеристика, отримана на контрольному зразку;  $X_{екс}$  – вимірювана характеристика, отримана внаслідок прискореного старіння.

5. Мінімальний термін життєвого циклу дерева з урахуванням прискореного старіння визначається за формулою:

$$t_{pec} = t_{\min} \cdot K_t. \quad (2.26)$$

Після обчислення прогнозованого терміну пропонується порівняти отриманий результат з необхідним строком життя дерев і, якщо він виходить незадовільним, обчислюється мінімум автокореляційних функцій по

кожному контрольованому параметру та видається рекомендація наскільки треба продовжити випробування і з якою частотою робити вимірювання характеристик.

Автокореляційна функція розраховується за формулою:

$$K_t = \frac{1}{(N-1) \cdot D} \sum_{i=1}^n (x_{ki} + (a_k t_{ki} - b_k))(x_{km} + (a_k t_{km} - b_k)), \quad (2.27)$$

де  $k = 1, \dots, N$ ;  $N$  – число контрольованих параметрів;  $m$  – число вимірювань кожного з параметрів;  $m = 1, n$  – зміщення функції;  $a_k, b_k$  – коефіцієнти в рівнянні регресії в певні моменти часу;  $t_{km}$  – крок зсуву за часом;  $x_{km}$  – параметр, зміщений на один крок;  $D$  – дисперсія.

Дисперсія обчислюється за формулою:

$$D = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ki} + (a_k t_{ki} - b_k))^2, \quad (2.28)$$

6. Для кожного контрольованого параметру підбирається перший мінімум автокореляційної функції (номер вимірювання, при якому отримується цей мінімум). Потім знаходиться певний середній номер вимірювання для усіх контрольованих параметрів, при якому спостерігається мінімум усіх автокореляційних функцій. Іншими словами, слід знайти номер вимірювання, який найменше пов'язаний з іншими. При продовженні випробувань має сенс проводити "некорельовані" вимірювання з інтервалом часу, що дорівнює  $\tau$ , а число вимірювань має становити  $M$ :

$$\tau = i_{\min} \cdot \frac{t_n}{n}; \quad (2.29)$$

$$M = n - \frac{n}{i_{\min}}, \quad (2.30)$$

де  $i_{\min}$  – номер вимірювання, при якому  $K_t$  є мінімальним;  $t_n$  – час останнього вимірювання;  $n$  – число вимірювань.

Остаточно, для прогнозування строку життєвого циклу дерева в залежності від зміни якісних показників деревного соку розроблено програму

на мові програмування математичного процесору MathLab, яка детально описана в Додатку Г.

Таким чином, розроблені нові та удосконалені існуючі методи та методики проведення експериментальних досліджень та оброблення їх результатів. Зокрема, вперше з метою вимірювання в зоні кореневого живлення дерева були запроваджені уточнені методики визначення показників  $pH$  та солоності ґрунту, а також вперше були запропоновані уточнені експрес-методики для визначення таких показників деревного соку, як: сахаристість, показник  $pH$  та в'язкість. Проведено удосконалення методів експериментально-статистичної обробки результатів дослідження. Виведено систему рівнянь регресії та розраховані їх статистичні характеристики [114]. Здійснено прогнозування строку життєвого циклу дерева в залежності від зміни якісних показників деревного соку [115].

### **2.3 Розробка математичної моделі зонування деревних насаджень за санітарним станом на основі даних моніторингу**

В основі розроблюваної моделі лежить математична операція апроксимації, що полягає у заміні вихідної функції  $f(x)$  функцією  $\varphi(x)$  з найменшим відхиленням між їхніми контрольними точками. Функція заміни  $\varphi(x)$  в даному випадку називається апроксимуючою функцією, а функція отримана в результаті аналізу експериментальних даних називається емпіричною формулою.

Деяка вихідна функція  $f(x)$  задається дискретно зі скінченною множиною точок  $x_1, x_2, \dots, x_3$ . Необхідно побудувати апроксимуючу функцію, де значення множини точок  $x_1, x_2, \dots, x_3$  знаходяться якомога ближче до значень точок функції  $f(x)$ .

Побудова емпіричної функції відбувається в два етапи:

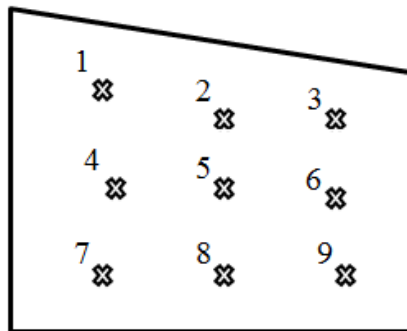
1. Аналізується вихідна функція  $f(x)$ , що формується певною кривою, яка будується якомога ближче до сукупності базових точок, в результаті чого

визначається якій із відомих функцій найбільш точно відповідає побудована крива.

2. Визначаються найкращі параметри вибраної емпіричної функції.

Алгоритм побудови математичної моделі зонування за санітарним станом деревних насаджень за даними моніторингу (на прикладі матриці  $3 \times 3$  контрольних точок вимірювання) полягає у наступному [112 – 114].

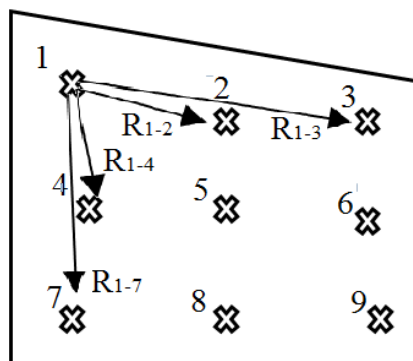
1. Виділяємо досліджувану ділянку та відмічаємо контрольні точки, в яких визначалися експериментальні дані:



2. Для кожної контрольної точки, починаючи з точки 1, визначається відстань від цієї точки до наступної контрольної точки:

- по горизонталі:  $R_{1-2}$ ,  $R_{1-3}$ ,  $R_{4-5}$ ,  $R_{4-6}$ ,  $R_{7-8}$ ,  $R_{7-9}$

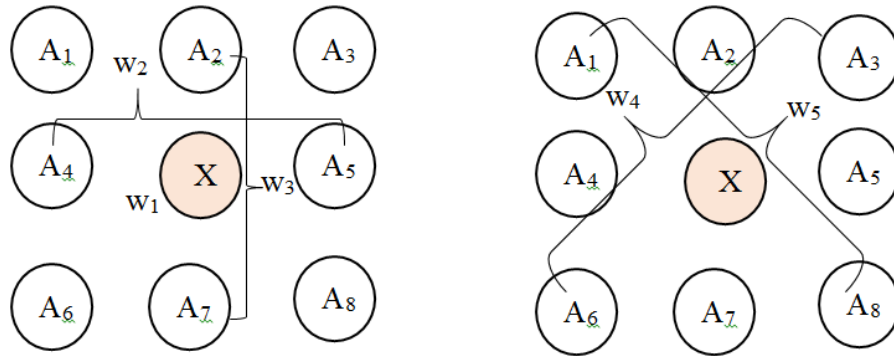
- по вертикалі:  $R_{1-4}$ ,  $R_{1-7}$ ,  $R_{2-5}$ ,  $R_{2-8}$ ,  $R_{3-6}$ ,  $R_{3-9}$



3. Будується матриця категорій санітарного стану (діапазон значень категорій 1 – 6) деревних насаджень (у наведеному прикладі – це матриця  $3 \times 3$ ) у відповідних контрольних точках 1 – 9:

$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_4$	$A_5$	$A_6$
$A_7$	$A_8$	$A_9$

4. Будується вагова матриця значень для обчислення значень між вузлами матриці стану, виходячи з припущення, що дерева на даній ділянці засаджувалися в один час, на однаковій відстані, при однакових умовах і в однаковому санітарному стані. Розрахунки проводилися за наступною схемою (2.31) – (2.35):



$$w_1 = \frac{X}{6}; w_2 = \frac{(A_4+A_5)}{12}; w_3 = \frac{(A_2+A_7)}{12}; w_4 = \frac{(A_3+A_6)}{12}; w_5 = \frac{(A_1+A_8)}{12}. \quad (2.31) - (2.35)$$

де значення «6» у знаменнику – максимальна категорія СС ДН.

Остаточно визначаються вагові коефіцієнти у приведені їх до рівноважного значення (з умови, що сума всіх вагових коефіцієнтів має дорівнювати одиниці (2.36):

$$ww = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5, \quad (2.36)$$

тоді:

$$w'_1 = \frac{w_1}{ww}; w'_2 = \frac{w_2}{ww}; w'_3 = \frac{w_3}{ww}; w'_4 = \frac{w_4}{ww}; w'_5 = \frac{w_5}{ww}, \quad (2.37) - (2.41)$$

Перевіряється виконання умови:

$$w'_1 + w'_2 + w'_3 + w'_4 + w'_5 = 1, \quad (2.36')$$

5. Проводиться апроксимація функцією  $n-1$  порядку, де  $n$  – розмірність матриці категорій СС (у нашому випадку  $n = 3$ , тоді маємо квадратичну функцію:  $y(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$  – вихідна функція). Апроксимуються  $n$  горизонтальних та  $n$  вертикальних функцій, які позначаються:

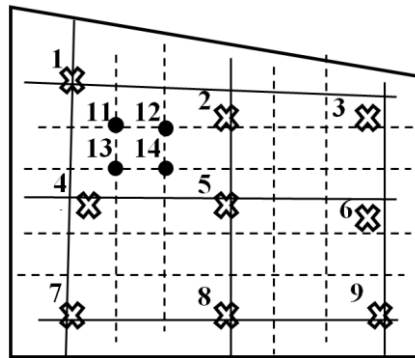
по горизонталі:  $y_1(x) - y_3(x)$

по вертикалі:  $y_4(x) - y_6(x)$

6. Знаходиться середньостатистичне відхилення  $\varepsilon$  апроксимованих даних від значень початкової матриці СС. Для усіх рівнянь відхилення має складати значення менше 1 (проте, можливі випадки, коли відхилення може складати більше 1 – це пов'язано з великими розбіжностями значень СС в окремих контрольних точках (для прикладу, між точках 1, 4, 7 значення розбіжностей складають, відповідно, +2 та -4).

7. Значення СС в точках перетину апроксимаційних кривих погоджуються шляхом усереднення їх значень.

8. Використавши метод усереднення по вертикальним та горизонтальним значенням у вузлових точках знаходяться значення СС в міжвузлових точках 11 – 14 тощо (міжвузлові ділянки при цьому розбиваються на однакові за розмірами квадрати, наприклад, на квадрати  $1 \times 1$  м).



9. Удосконаленим алгоритмом АВС-маски та застосовуючи вагові коефіцієнти  $w_1 - w_5$  уточнюються значення СС в міжвузлових точках 11 – 14 тощо [107].

10. Будується карта зонування досліджуваної ділянки, за якою отримується матриця станів ДН.

11. Розраховується процентне співвідношення між деревами різних категорій СС для досліджуваної ділянки.

12. Будується діаграма розподілу дерев на досліджуваній ділянці за категоріями (приймаємо нормальний (гаусівський) розподіл, що говорить про те, що на СС дерев впливає величезна кількість випадкових, не пов'язаних між собою факторів, і це є істиною).



Загальний алгоритм побудови математичної моделі зонування за санітарним станом деревних насаджень представлений на рис. 2.13 [114].

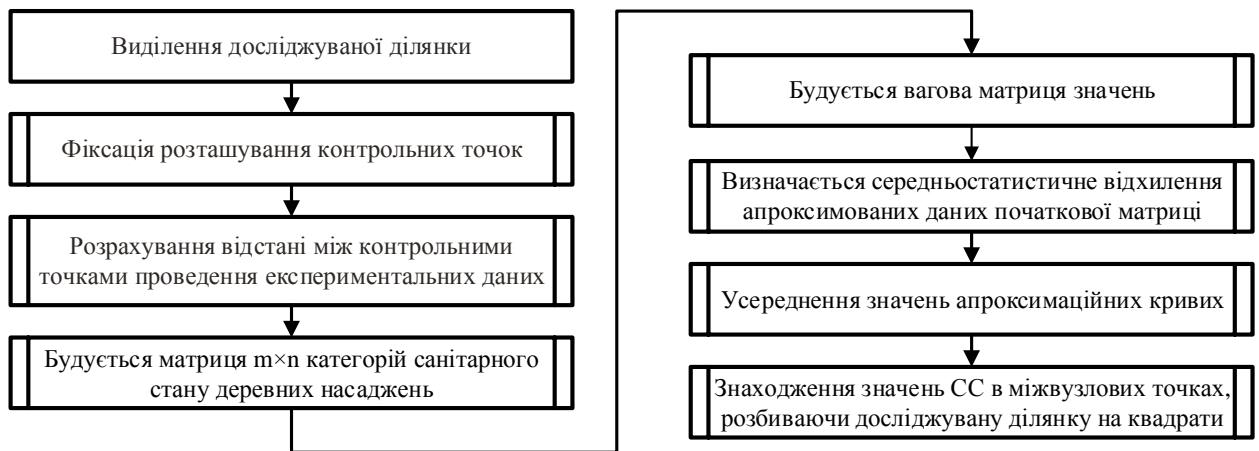


Рис. 2.13. Загальний алгоритм побудови математичної моделі зонування досліджуваної ділянки за санітарним станом

В результаті проведених розрахунків (Додаток Д) отримані підсумкові значення та складена карта зонування за СС ДН, а також діаграма процентного розподілу дерев за категоріями (рис. 2.14) [114].

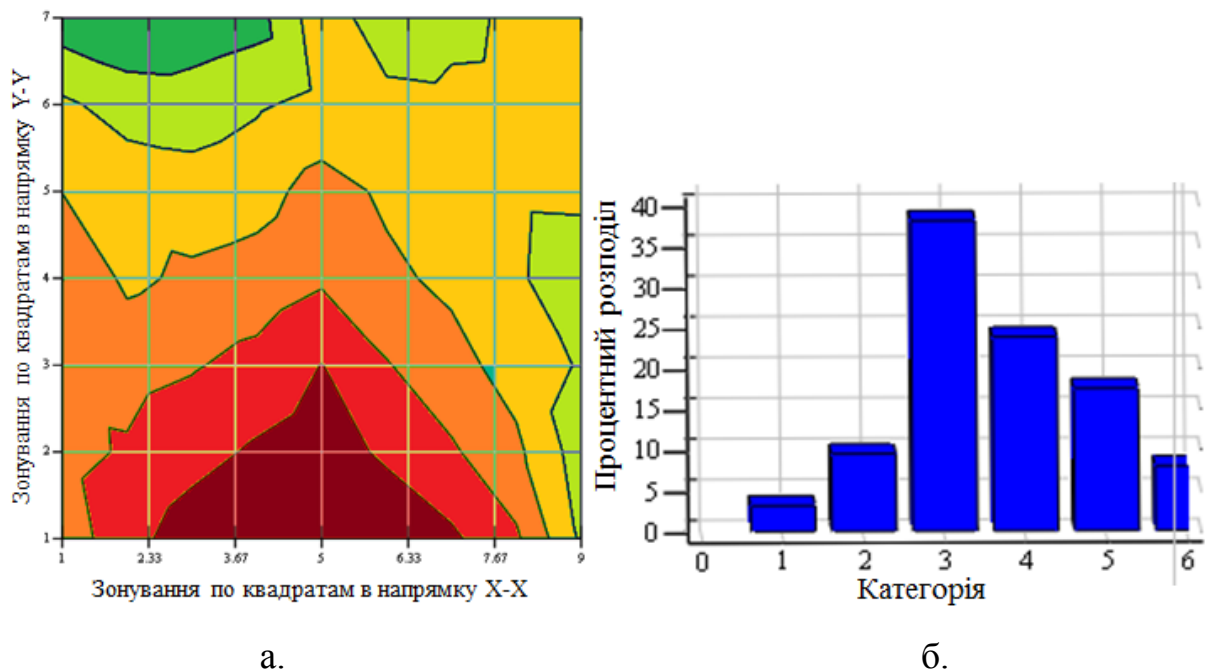


Рис. 2.14. Зовнішній вигляд карти зонування ділянки 9×7 метрів по санітарному стану деревних насаджень (а) та діаграма процентного розподілу дерев за категоріями (б)

Порівняльний аналіз результатів моніторингу між розробленим комплексним та візуальним методами (держнагляд) представлений в табл. 2.9 [115].

Таким чином комплексний метод на відміну від візуального методу є більш точним, оскільки надає інформацію щодо категорії СС ДН. Результат формується за значеннями якісних показників деревного соку, що відображають внутрішній фізіологічний стан дерева, який безпосередньо впливає на його СС.

Табл. 2.9. Порівняльний аналіз моніторингу між розробленим комплексним та візуальним методами

Характеристика	Візуальний метод	Комплексний метод
Складність	Низька	Середня
Кваліфікація працівників	Не потребує високої кваліфікації працівників	Не потребує високої кваліфікації працівників
Інформативність	Низький рівень інформативності	Високий рівень інформативності
Результат моніторингу	Загальний висновок про санітарний стан деревних насаджень на основі візуальних ознак аварійності	Карта зонування досліджуваної ділянки за санітарним станом деревних насаджень та процентний розподіл кількості дерев

#### **2.4 Алгоритм проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень**

Проведення регулярного моніторингу санітарного стану деревних насаджень необхідне для визначення впливу різноманітних негативних факторів, а також для прогнозування стану насаджень в майбутньому.

Розроблений алгоритм проведення моніторингу СС складається з двох основних блоків (рис.2.15) [115]:

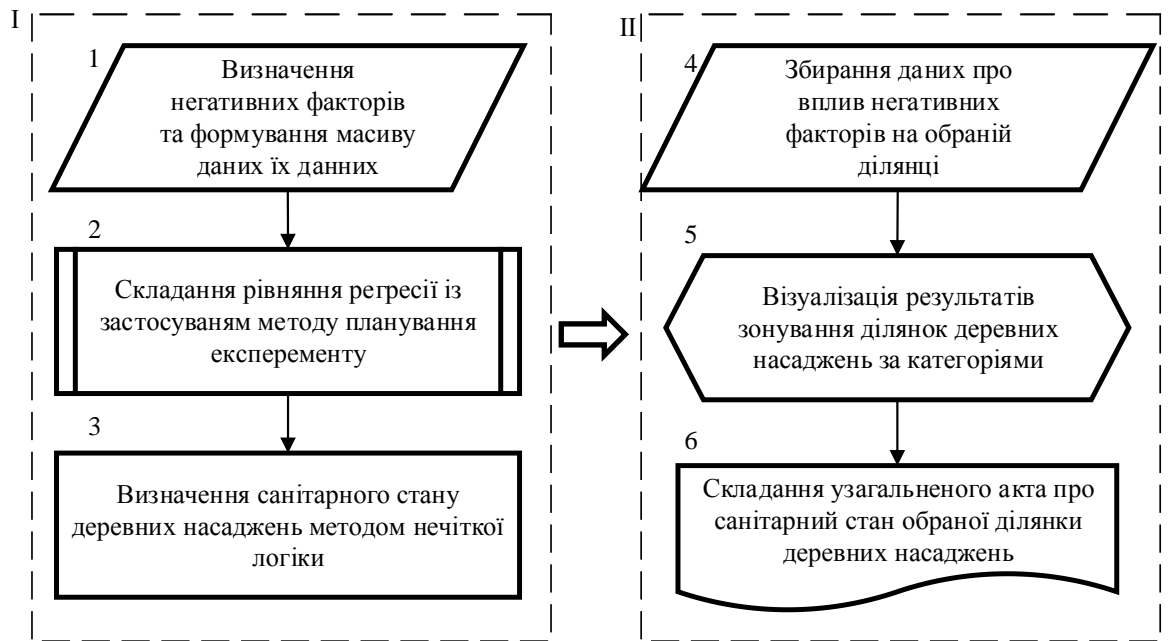


Рис. 2.15. Розроблений алгоритм проведення моніторингу СС  
деревних насаджень

Блок I – відповідає за налаштування інформаційно-вимірювальної системи моніторингу. Основна задача блоку включає в себе:

1. формування бази даних та правил,
2. встановлення залежності впливу негативних факторів на якісні показники деревного соку.

Цей блок складається з трьох підблоків, що відповідають наступним трьом етапам дій [116]:

Перший етап: Вибір негативних факторів, а також визначення їх граничних значень, які є основою накопичення масиву даних для подальшої математично-статистичної обробки.

Другий етап: При використанні методу планування експерименту (повний план), відбувається математична обробка масиву даних, які були отримані після першого етапу. Формування рівнянь регресії: проводиться їх перевірка на коректність та адекватність.

Третій етап: Використання методу нечіткої логіки (алгоритм Мандамі) для точного визначення категорії санітарного стану досліджуваних деревних насаджень. Метод дає можливість уточнювати залежність впливу негативних

факторів оточуючого середовища на СС ДН, що дозволяє збільшувати точність отриманих результатів (зменшувати відносну похибку визначення СС максимально до 2 – 3%).

Блок II – відповідає за отримання та обробку експериментальних досліджень. Цей блок складається з трьох підблоків, що відповідають наступним трьом етапам дій:

Четвертий етап: Збір масиву експериментальних даних про вплив зовнішніх негативних факторів на якісні показники деревного соку в межах обраної ділянки. Використовуючи моделі запропоновані на другому етапі проводиться математично-статистична обробка.

П'ятий етап: Картування обраної ділянки. Проводиться візуалізація зон розподілу окремих груп деревних масивів відповідно категоріям санітарного стану. Виконання короткочасного прогнозування на строк 1-3 роки зміни зонування санітарних ділянок деревних насаджень.

Шостий етап: За результатами проведених досліджень підготовка та складання узагальненого акту. Прийняття рішення про виконання необхідних профілактичних заходів, та про необхідність проведення санітарної вирубки аварійних дерев.

Таким чином, розроблений загальний алгоритм проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень, що складається з двох основних блоків, кожен з яких включає три етапи і може служити основою забезпечення високоточної та ефективної інформаційної системи моніторингу СС ДН.

## **2.5 Висновки до розділу 2**

1. Визначено основні критерії вибору об'єктів для моніторингу санітарного стану деревних насаджень для чого проаналізовано розподіл площ лісів Черкащини за породами дерев та їх санітарним станом. В якості

об'єкту дослідження обрано соснові насадження Черкаської області, як такі, що максимально підтвержені масовим всиханням.

2. Розроблено нові та удосконалено існуючі розрахунково-експериментальні методи та методики для проведення наукових досліджень. Вперше з метою вимірювання в зоні кореневого живлення дерева були запроваджені уточнені методики визначення показників  $pH$  та солоності ґрунту, також вперше були запропоновані уточнені експрес-методики для визначення таких показників деревного соку, як: сахаристість, показник  $pH$  та в'язкість.

3. Методом багатофакторного планування експерименту побудовані математичні регресійні моделі, які описують залежності основних показників деревного соку (показника  $pH$ , рівня цукру та в'язкості) від зовнішніх кліматичних факторів та розраховано статистичні характеристики цих моделей.

4. Розроблена динамічна модель, що використовує механізм нечіткого виведення за Мамдані та центроїдний метод дефазифікації, а також результати розв'язання рівнянь регресії, отриманих методом планування багатофакторного експерименту, для формування бази правил моделі, що дозволяє високоточно (відносна похибка не перевищує 4%) визначати санітарний стан деревних насаджень і алгоритм якої (моделі) пропонується в основі системи підтримки прийняття рішень інформаційно-вимірювальної системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

5. Проведено математичне моделювання зонування деревних насаджень, що дозволило з високою точністю (відносна похибка не перевищує 5%), надійністю (ймовірність безвідмовної роботи ІВС моніторингу не менше 0,95), оперативністю (час між запитом та отриманою адекватною відповіддю між пристроєм управління та вимірювальним датчиком не перевищує 0,31 – 0,51 мс) та в реальному режимі часу проводити моделювання розподілу дерев за категоріями їх санітарного стану, а також прогнозувати динаміку зміни меж зон розподілу.

6. Розроблено загальний алгоритм проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень, що дозволяє довготерміново спрогнозувати зміну санітарного стану цих насаджень і може служити основою для високоточної та ефективної інформаційної системи моніторингу.

### **РОЗДІЛ 3**

## **РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ САНІТАРНОГО СТАНУ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ**

В розділі розглянуто основні особливості виготовлення мікросенсорів, які використовуються для визначення якісних показників деревного соку: кислотності, цукровості та в'язкості [117 – 120]. Розроблено конструкцію мікросенсору, яка відповідає основним вимогам надійності, дешевизни, простоти та мінімальної шкоди для дерева при його застосуванні. Основну частину пристрою виготовлено з природного матеріалу (віскозного волокна) [121], яке забезпечує повне саморозкладання сенсору з часом та заживлення місця його впровадження. Строк дії такого сенсора (до його повного саморозсмоктування) становить 36 місяців.

Визначено вимоги до конструкції розроблювальної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Встановлено найбільш негативні зовнішні фактори, що мають вплив на ефективність вимірювання [122 – 123]. Складено структурну та функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи моніторингу.

Розроблено програмне забезпечення для проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень, що дозволяє автоматизувати процес контролю та уніфікувати експериментальні вимірювання, а також оперативно проводити віддалений (дистанційний) моніторинг санітарного стану [121].

Визначено, що удосконалення апаратно-методичної бази та інструментального забезпечення приводить до покращення ефективності процесу моніторингу.

### **3.1 Технологічні основи виготовлення мікросенсорів для визначення якісних показників деревного соку**

Основна задача досягнення мети дисертаційного дослідження щодо встановлення закономірностей впливу якості деревного соку на санітарний стан деревних насаджень передбачає необхідність виготовлення спеціальних мікросенсорів, що імплантуються в досліджуване дерево. Такі мікросенсори мають відповідати наступним основним вимогам: простота та дешевизна у виготовленні і використанні, а також максимальна безпека для досліджуваного дерева. Ступінь безпеки від впливу мікросенсору на стан дерева характеризується здатністю матеріалів, з яких такі сенсори виготовлені до біосумісності. Для усунення можливого шкідливого впливу таких сенсорів після їх застосування (утворення в місці імплантації датчику отворів, тріщин та гнилів), мають бути використані спеціальні матеріали, що саморозкладаються та сприяють самозакисненню дерева.

Таким чином, розроблювані мікросенсори мають виконувати наступні функції:

- керувана безперервна подача свіжого деревного соку до вимірювального пристрою;
- можливість блокування/розблокування витікання деревного соку з капіляру до/після закінчення вимірювального процесу;
- саморозкладання корпусу сенсору з часом з утворенням самозакиснюючих речовин.

Забезпечення безпечного використання мікросенсора для живого дерева обумовлюється його мініатюрними розмірами. Зовнішній вигляд мікросенсора представлений на рис.3.1.

Мікросенсор має форму паралелепіпеда, на внутрішню грань та половину торця якого нанесено Au/Pt-покриття, що виконує функцію електропровідного електроду. Середина сенсору представляє собою пустий



капіляр діаметром порядку 30 мкм, яким деревний сік подається до вимірювального пристрою [117].

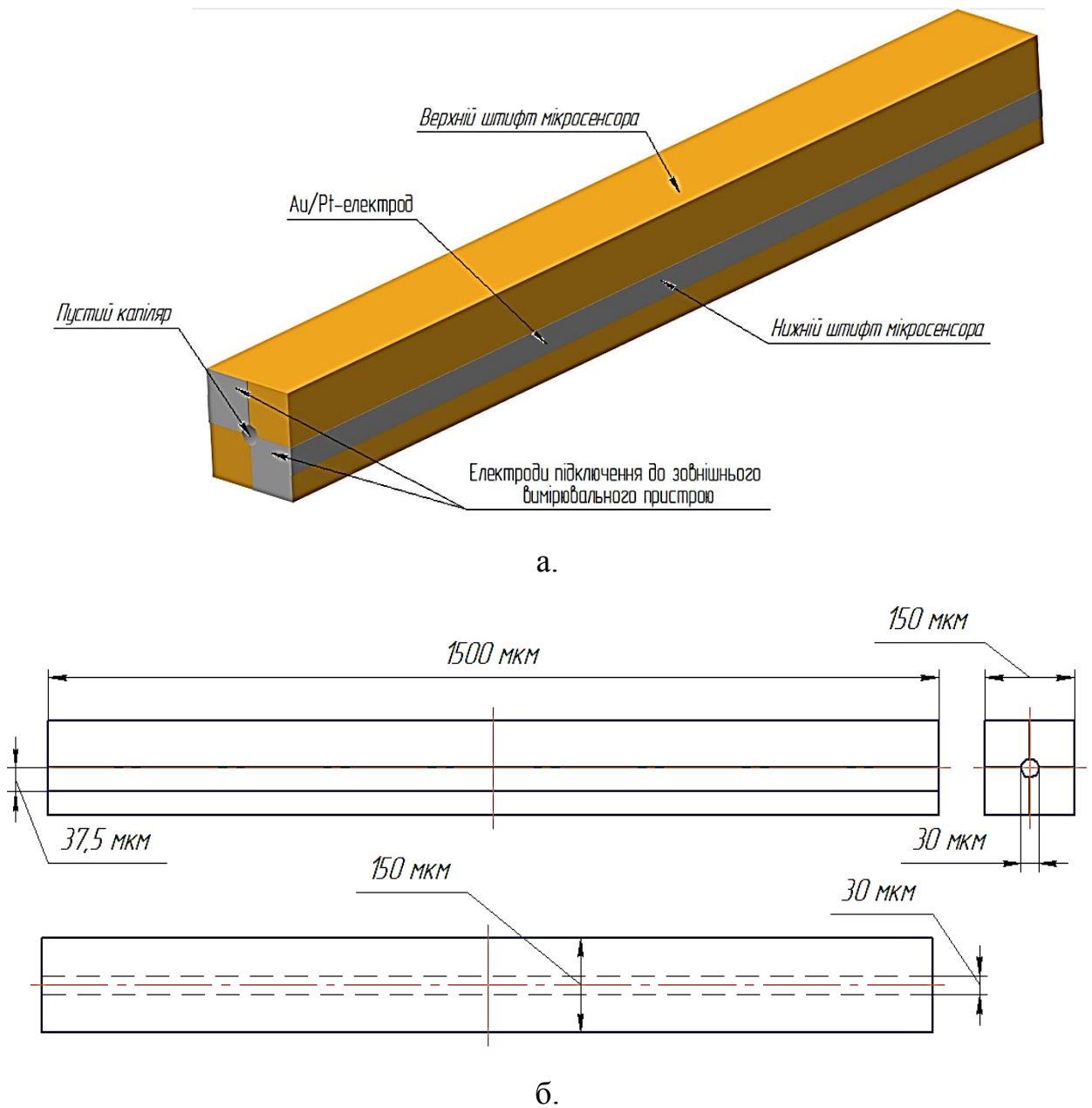


Рис.3.1. Зовнішній вигляд (а) та габаритне креслення (б) вимірювального мікродатчика

Частини корпусу розроблюваного мікросенсора виготовляються за аддитивною технологією SLA методом 3D-прінтингу з віскозного волокна [118], що представляє собою природний матеріал, якому властива висока гнучкість та здатність до розкладання під впливом атмосферних факторів (високої вологості, ультрафіолетового випромінювання та іншого). Такий

зовнішній вплив веде до повного саморозкладання віскозного корпусу пристрою протягом до 36-ти місяців.

В цілому, послідовність виготовлення корпусу мікросенсору описана нижче [118]:

1. Сітчата платформа опускається у ємність з рідким полімером.
2. На поверхню рідкого фотополімеру спрямовується лазерний промінь ультрафіолетового випромінювання, який по-шарово полімеризує ті частини полімеру, які відповідають елементам корпусу мікросенсора.
3. Після затвердіння чергового шару, платформа переміщується на один крок відкриваючи можливість формування наступного шару корпусу (процедура за п.2 повторюється).
4. Після завершення формування корпусу і для остаточного затвердіння матеріалу корпусу мікросенсору відбувається його загальне засвітлювання ультрафіолетовим випромінюванням.

Технологія процесу нанесення золотого/платинового покриття для виготовлення електродів електрохімічним методом передбачає нанесення на грані виробу металевого покриття з розчину хлорного золота (або хлорної платини) [119]. Після процесу електрохімічного нанесення утворюється золота/платинова плівка малої пористості і товщиною 0,2 – 0,3 мкм.

Для проведення експериментів на імплантованому у стовбур дерева мікросенсорі необхідно забезпечити неможливість проникнення всередину дерева бактеріальних та грибкових захворювань. Так, утворений при імплантації мікросенсору отвір, може стати осередком розмноження різноманітних хвороб, що зумовлюється накопиченням вологи в цих отворах та температурних перепадах. Для біологічної безпеки проведення досліджень санітарного стану дерева необхідно забезпечити герметичність утворених отворів. Для цього слід застосовувати спеціальну замазку, виготовлення якої відбувається за описаною нижче технологією [120]:

1. Чотири частини бджолиного воску та каніфолі розтоплюються на нагрівальному пристрої окремо один від одного.

2. Ємність з каніфоллю залишається в нагрітому стані, в неї додається розплавлений віск та одна частина льняної олії (постійно помішуючи).

3. Дві частини меленого деревного вугілля додається в утворену масу вже після зняття її з вогню; отримана суміш ретельно перемішується.

Послідовність процесу імплантації мікросенсора в досліджуване дерево представлена на рис.3.2.

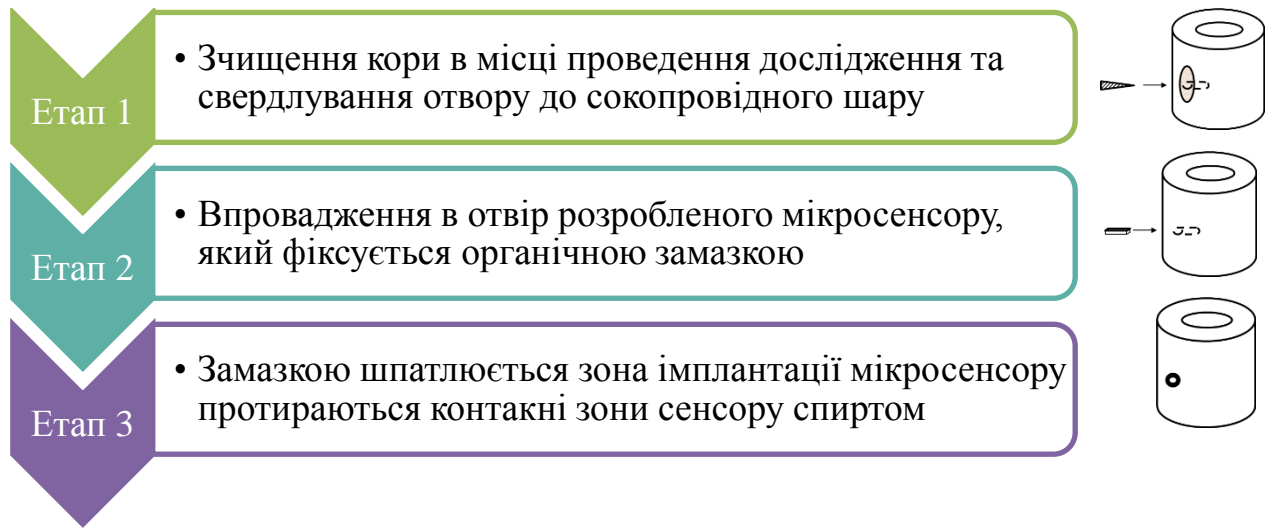


Рис. 3.2. Послідовність імплантування мікросенсора в досліджуване дерево

Порядок проведення експерименту з використанням мікросенсору для визначення СС ДН описаний нижче:

- готується мікросенсор та пристрій визначення якісних характеристик деревного соку (здійснюється протирання контактних ділянок спиртом, під'єднання до сенсору пристрою визначення);
- пристрій вимірювання підключається до сенсору; проводиться тестування останнього;
- на електроди сенсору подається живлення для його розігріву і розплавлення затверділих залишків смоли в капілярі сенсору для його очищення;
- включаються помпи на пристрої визначення для викачування деревного соку з капіляру;
- за швидкістю викачування соку та діаметром капіляру визначається в'язкість соку;

- іонометричним методом визначається показник  $pH$  та цукровість соку;
- завершальні дії (відключення та очищення пристрою від залишків деревного соку).

Таким чином, автором запропонована принципово нова конструкція мікросенсору, що відповідає основним вимогам дешевизни, простоти та безпеки його використання для визначення санітарного стану дерева. Вперше запропонована технологія 3D-прінтингу корпусу сенсорної частини пристрою, а саме: капілярного мікросенсору, з природного матеріалу (віскози), який забезпечує його повне саморозкладання з часом та подальше заживлення місця імплантації сенсору [117 – 123]. Встановлено, що строк дії такого сенсора не перевищує 36 місяців.

### 3.2 Проектування архітектури інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень

В процесі аналізу вимог до конструкцій інформаційно-вимірювальних систем моніторингу санітарного стану деревних насаджень було встановлено, що найбільший вплив мають наступні вимоги, рис. 3.3.

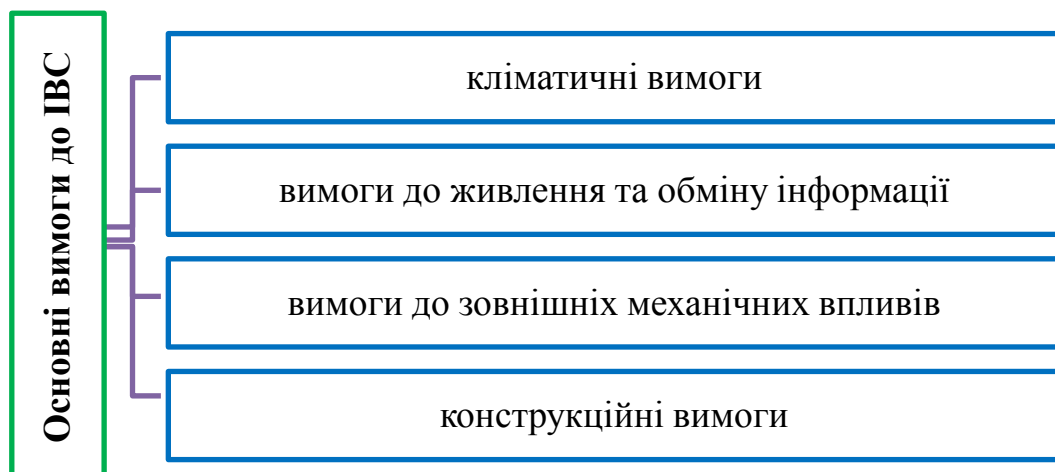


Рис. 3.3. Основні вимоги до конструкції ІВС

Для дотримання безвідмовної роботи пристроїв ІВС визначені основні робочі параметри та діапазони їх значень, які представлені в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Основні робочі параметри розроблюваної ІВС

Вимоги щодо конструкції ІВС	Робочі параметри	Діапазони значень
Кліматичні вимоги	Температура повітря	+4 – +35 °С
	Вологість ґрунту	≥ 85%
Вимоги до живлення та каналу обміну інформацією	Робочий діапазон напруги живлення	(4,3 – 5,5)В ± 0,5 В
	Частота інформаційного каналу	(2,4 – 2,48)ГГц ± 0,35 ГГц
	Вплив зовнішніх електромагнітних полів	$E \leq 1 \text{ мкА/м};$ $H \leq 3 \text{ мВ/м}$
Вимоги до зовнішніх механічних впливів	Вібрації	≤ 0,8 мм/с
	Динамічні механічні навантаження	≤ 0,01 кг·м/с
Конструкційні вимоги	Ступінь захисту конструкції	IP54
	Категорія пожежної небезпеки	ДН
	Клас електрозахисту	0

Для підвищення стійкості пристроїв до впливу зовнішніх факторів можна виділити наступні шляхи [123]:

- використання спеціальних конструкційних рішень для забезпечення ефективної герметизації, охолодження та електричного захисту елементів пристроїв ІВС. Для усунення конструкційних впливів виконується рознесення окремих блоків;
- вибір оптимальних матеріалів елементів конструкції інформаційно-вимірювальної системи та способів захисту. Використання деталей конструкції, які не кородують в умовах хімічно та біоагресивного оточуючого середовища;
- дотримання умов збереження, транспортування та експлуатації пристрою при оптимальних кліматичних умовах, належній вентиляції, умовах герметичності та забезпечення електричного захисту корпусу приладу відповідно до IP54.

Таким чином, основні кліматичні вимоги, які висуваються до розроблювальної ІВС є наступними, табл. 3.2.

Табл. 3.2. Основні вимоги до розроблюваної ІВС

Відносна вологість, %	Температура, °С		Тривалість випробувань, годин	Витримка за нормальних умов, год
	Максимальна	Мінімальна		
Вологостійкість при тривалих дослідженнях				
35 – 90	+ 35 ± 4	+ 4 ± 2	7	8 – 12
Теплостійкість				
—	+ 45 ± 2		10	6 – 12
Стійкість до утворення плісняви				
90 – 100	+ 35 ± 4		56	48

Аналіз отриманих результатів випробовування розроблюваної ІВС виявив, що найбільший вплив на працездатність, надійність та точність отриманих даних здійснюється від дії зовнішніх електромагнітних полів (створення електромагнітних перешкод в інформаційному каналі передавання даних) та значення напруги живлення самого пристрою (послаблення приймання інформаційного сигналу пристроєм, що веде до різкого зменшення відстані між безпроводними пристроями обміну інформацією). В той же час, використання засобів захисту від впливу кліматичних факторів вимагають найбільших економічних витрат (до 87% від вартості ІВС моніторингу санітарного стану деревних насаджень). Вплив таких негативних факторів на точність та надійність отриманих даних, а також економічність використання представлені на рис.3.4.

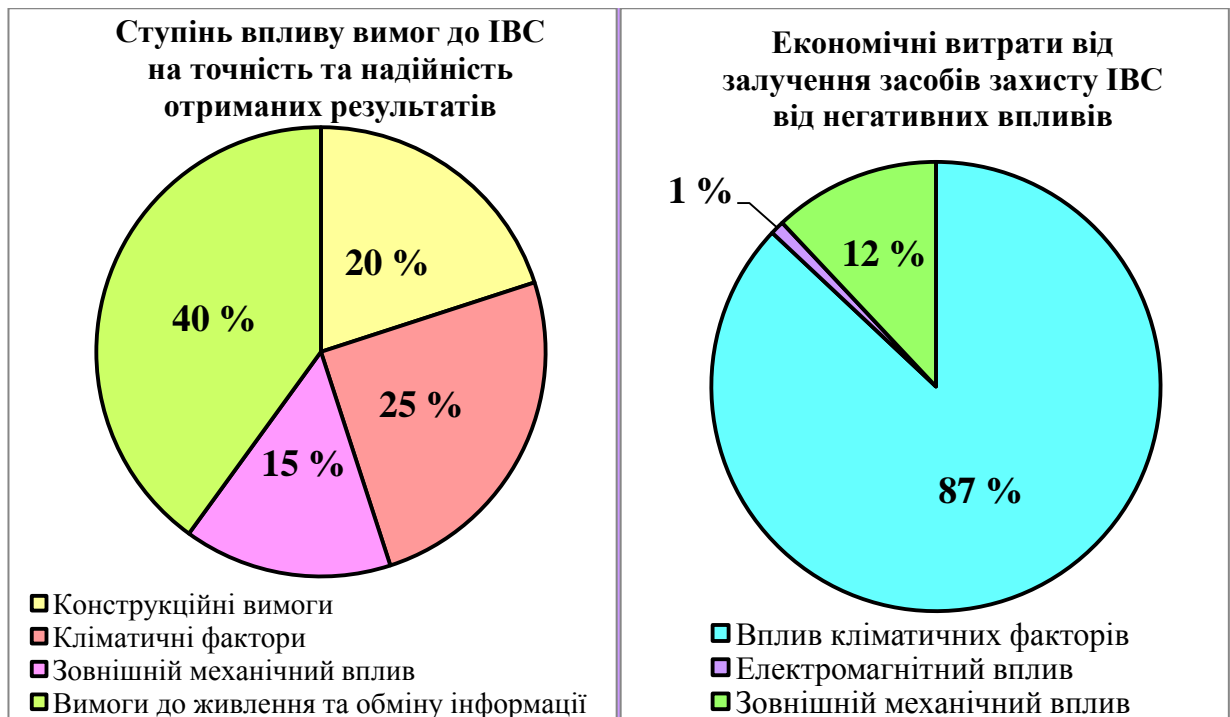


Рис. 3.4. Діаграми ступеню впливу вимог до ІВС (а) та економічних витрат від залучення засобів захисту ІВС (б)

Одним з головних елементів створення інформаційно-вимірювальної системи є вибір та обґрунтування комплексу функціональних задач. Проведений аналіз функціональних задач [115] вказує на те, що за заданих умов застосування ІВС, її практична реалізація є багатоваріантною. Зокрема одна й та сама задача може бути реалізована різними моделями, методами та алгоритмами.

Серед існуючих наборів моделей та алгоритмів в процесі розробки ІВС обираються найбільш ефективні для конкретного об'єкта управління.

На практиці всі системи обробки даних незалежно від сфери їх використання включають однаковий набір компонентів (складових) – видів забезпечення.

В межах розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи слід відмітити такі види забезпечення:

- Інформаційне забезпечення – сукупність методів та засобів щодо розміщення й організації інформації, методів створення та розміщення бази вимірюваних даних ІВС.

- Методологічне забезпечення – сукупність методів та засобів їх реалізації – методик, моделей, стендів та вимірювальних пристроїв, які дозволяють з мінімальними похибками проводити моніторинг визначуваних параметрів.
- Програмне забезпечення – комп'ютерна реалізація архітектури інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує її цілісність та проведення безпомилкового обміну даними між блоками ІВС.
- Технічне забезпечення – сукупність технічних засобів, зокрема: датчиків, блоків комунікації, накопичення та обробки даних.

Достовірність та якість рішень, які приймаються ІВС в процесі зонування деревних насаджень та прогнозування змін їх СС суттєво залежать від розробленого забезпечення.

В дисертаційному дослідженні пропонується автоматизувати процес моніторингу санітарного стану деревних насаджень шляхом визначення показників  $pH$  та солоності ґрунту та температури оточуючого середовища в процесі дистанційного (безконтактного) опитування сенсорів розташованих в безпосередній близькості від кореневої системи контрольних зразків дерев, обраних із досліджуваного масиву насаджень. Шляхом математичного оброблення таких показників ґрунту методом регресійного аналізу визначаються якісні характеристики деревного соку (показники  $pH$ , цукровості та в'язкості) – і далі – категорія санітарного стану таких контрольних дерев. За запропонованою математичною моделлю (див. п.2.3) проводиться зонування ДН за їх категоріями СС.

Таким чином, розроблювана ІВС має наступні переваги :

- дотримання найбільш раціональної схеми вимірювання при опитуванні – збиранні інформації з датчиків стану ґрунтів;
- мінімізація впливу оператора на процес моніторингу;
- здійснення експрес-контролю СС ДН шляхом дистанційного спостереження та управління процесом моніторингу.



Загалом, схема обміну інформацією між ІВС, вимірювальними датчиками та іншими інформаційними пристроями і мережами за можливими каналами зв'язку, наведена на рис.3.5 [121].

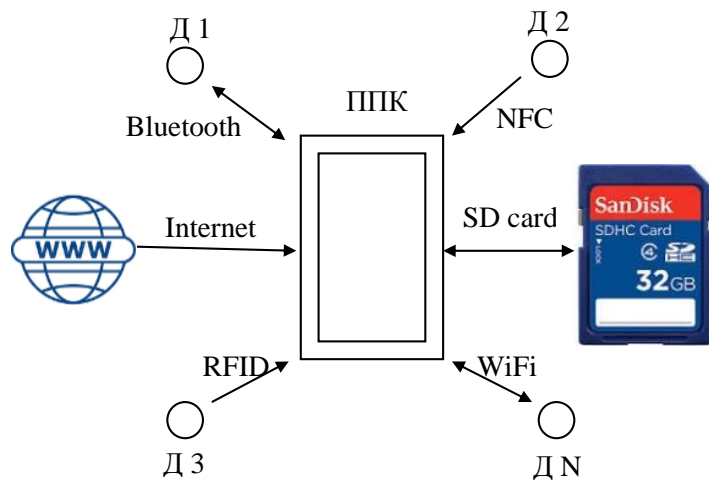


Рис. 3.5. Схема обміну інформацією між ІВС, вимірювальними датчиками та іншими інформаційними пристроями і мережами

Відповідно до схеми, рис.3.5, пропонується провести розробку комплексу обладнання для створення ІВС моніторингу СС ДН.

Послідовність дій з розроблення ІВС моніторингу санітарного стану деревних насаджень наведена на схемі представлений на рис.3.6.

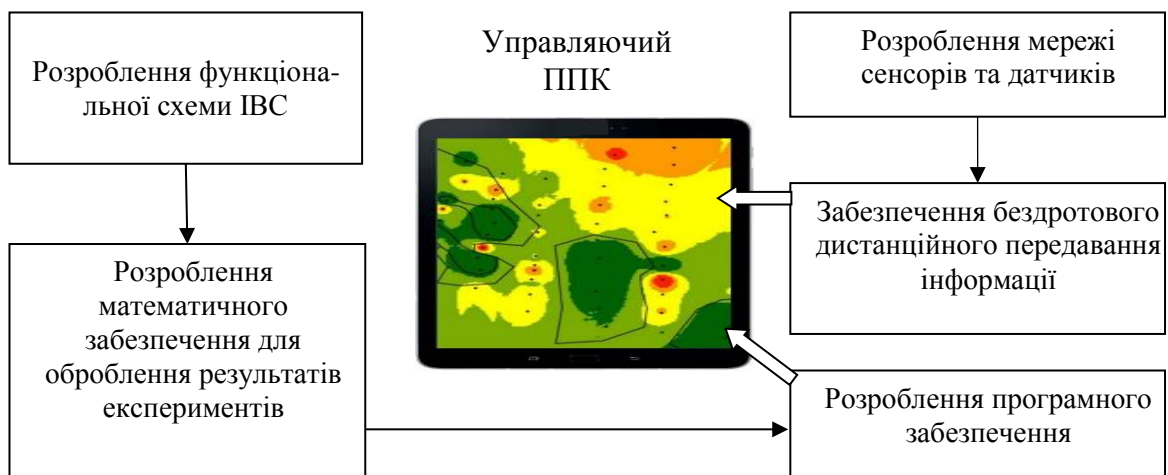


Рис. 3.6. Послідовність розроблення ІВС моніторингу СС ДН

Розроблювана система будується на основі дворівневої багатосерверної моделі «клієнт – сервер». Тут, сервер – управляючий

пристрій (планшетний персональний комп'ютер – ППК), а клієнти – вимірювальні датчики, що мають однаковий пріоритет при їх опитуванні або передаванні інформації з них (загалом, пріоритетність опитування датчиків визначається їх відстанню (потужністю отримуваного/передаваного сигналу) до сервера).

Процес моніторингу має починатися зі встановлення та орієнтації сенсорів показника солоності та показника  $pH$  ґрунту, а також прецизійного температурного вимірювача. Це єдиний етап процесу моніторингу, що потребує залучення оператора.

Наступний етап полягає в перевірці встановлених сенсорів з використанням тестових зразків (не менше п'яти), для уникнення виникнення суб'єктивних похибок та впливу людських факторів, які включають:

- встановлення прецизійного температурного вимірювача в місці, де на нього не потрапляє пряме сонячне випромінювання;
- встановлення датчиків  $pH$  / солоності в місці зі штучно порушеним ґрунтом на глибині залягання основної кореневої системи дерева.

За умов невідповідності результатів тестування з візуальною оцінкою СС дерева, управляючий пристрій ІВС видає сигнал про необхідність зміни місця розташування вимірювальних датчиків оператором. Після проведення коректної тестової перевірки, ІВС дозволяє приступати безпосередньо до моніторингу в автономному режимі в такій послідовності [123]:

1. Управляючий пристрій відправляє запит на отримання даних з вимірювальних датчиків.
2. Датчик опрацьовує отриманий запит та відправляє на управляючий пристрій запитовані дані.

Дворівнева модель «клієнт – сервер» є оптимальною для виконання задач з кількістю менше 100 зовнішніх сенсорів. Оскільки, при обслуговуванні великої кількості клієнтів операційна система сервера перенавантажується через управління численними підключеннями до сервера.

Така ІВС з клієнт-серверною архітектурою має наступні переваги:

- зниження мережевого трафіку при виконанні запитів;
- архітектура «клієнт-сервер» дозволяє одночасне опитування сенсорів, коли їх кількість перевищує 10 – 15 шт.;
- гнучкість управління користувачькими привілеями та правами доступу до різних об'єктів бази даних, архівації даних, резервного копіювання та оптимізація виконання запитів.

Таким чином, запропонований в роботі проект ІВС моніторингу СС ДН дозволяє автоматизувати процес контролю, проводити дистанційні спостереження за СС на певній ділянці деревних насаджень та прогнозувати зміни стану в межах цієї ділянки.

*Розробка функціональної схеми системи моніторингу.* Електронний блок вимірювання – це сполучна ланка між ППК та блоком спеціально виготовлених електродів, що будуть занурені у ґрунт [121 – 123]. Цей блок містить електронні схеми, які приймають, обробляють вхідні дані з вимірювальних датчиків за командами ППК та передають результати вимірювань до керуючої програми. Структурна схема ІВС представлена на рис.3.7.

Електронний блок керування включає шість функціонально завершених модулів: портативне джерело живлення (1); датчики температури (2), кислотності  $pH$  (4) та солоності (5); модуля блоку управління вимірювальними датчиками (3) та модуля дистанційного зв'язку з ППК (6).

Блок вимірювання зв'язується з управляючим пристроєм (портативним планшетним комп'ютером) через безпроводний канал передавання даних (7).

Функціонування електронного блоку вимірювання відбувається наступним чином.

Команди запиту від програми керування ППК надсилаються через безпроводний канал (WiFi, Bluetooth або інше – в залежності від схемотехнічного рішення блоку вимірювання) на модуль безпроводного зв'язку блоку вимірювання (6). Далі команди передаються по загальній шині

на мікроконтролерний модуль управління блоком вимірювальних датчиків (3), який об'єднує усі вимірювальні модулі блоку.

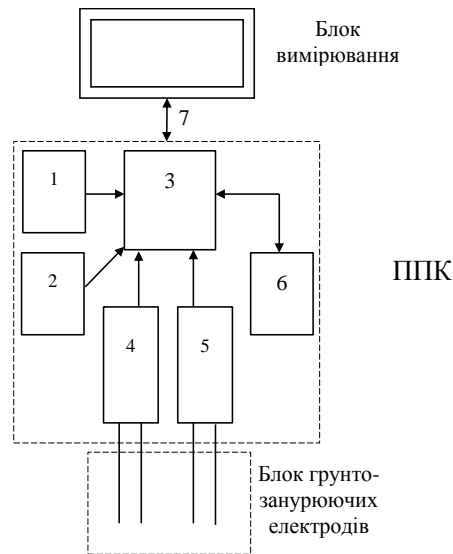


Рис. 3.7. Структурна схема розробленої інформаційно-вимірювальної системи: 1 – портативне джерело живлення; 2 – датчик температури; 3 – модуль управління блоком вимірювальних датчиків; 4 – датчик водневого показника рН; 5 – датчик солоності; 6 – модуль дистанційного зв'язку з ППК; 7 – безпроводний канал передавання даних

Загальна 16-бітна шина містить 3-бітну шину адреси, 10-бітну шину даних та 3-бітну шину керування.

Портативне джерело живлення (1) обирається з урахуванням можливості якнайдовшого збереження електричної ємності.

За відсутності запиту від керуючого пристрою (ППК), модуль управління блоком вимірювальних датчиків (3) знаходить в «сплячому» режимі з мінімальним споживанням енергії. В такому випадку інформація із зовнішніх датчиків не поступає на модуль управління.

Модуль управління блоком вимірювальних датчиків (3) переходить в робочий режим енергоспоживання, за наявності запиту на отримання інформації щодо стану датчиків від керуючого пристрою на модуль дистанційного зв'язку (6). Модуль (3) починає аналізувати сигнали про робочий стан датчиків температури (2), кислотності (4) та солоності (5).

Формується сигнал, який описує стан датчиків: робочий «x111», аварійний режим для усіх («x000») або для деяких датчиків (наприклад, аварійний режим датчика кислотності – «x101»). Далі, модуль управління (3) передає інформацію через модуль дистанційного зв'язку (6) на управляючий пристрій (ППК). Відповідно до отриманої інформації формується база даних про координати розташування датчиків та їх працездатність.

Надходження запиту про отримання вимірюваної інформації на модуль дистанційного зв'язку (6) від управляючого пристрою (ППК) призводить до початку роботи модуля управління блоком вимірювальних датчиків (3). Після чого модуль по чергово (не менше дев'яти циклів) починає опитувати датчики температури (2), кислотності (4) та солоності (5). За отриманим середнім значенням цих показників модуль управління блоком вимірювальних датчиків (3) формує 8-бітний сигнал про середнє значення кожного з показників. Дев'ятий та десятий біти – інформаційні, які вказують на параметр, що передається, таким чином: X01 – інформація про температуру, X10 – про кислотність, X11 – про солоність.

Отриманий сигнал по шині передається в модуль дистанційного зв'язку з ППК (6), та через безпроводний канал передавання (7) на управляючий пристрій (ППК). Відповідно до отриманої інформації будуються залежності розподілу деревних насаджень зон за категоріями СС.

В загальному випадку, розроблювана ІВС дозволяє:

- проводити автоматичне керування вимірювальними датчиками;
- дистанційно отримувати та опрацювати вимірювану інформацію;
- здійснювати графічну візуалізацію ділянки ДН за категоріями СС з розташуванням СС окремих дерев;
- високоточно прогнозувати СС деревних насаджень без участі (або з мінімальною участю) оператора;
- здійснювати гнучку комунікацію між управляючим пристроєм та вимірювальними датчиками через безпроводні канали зв'язку.

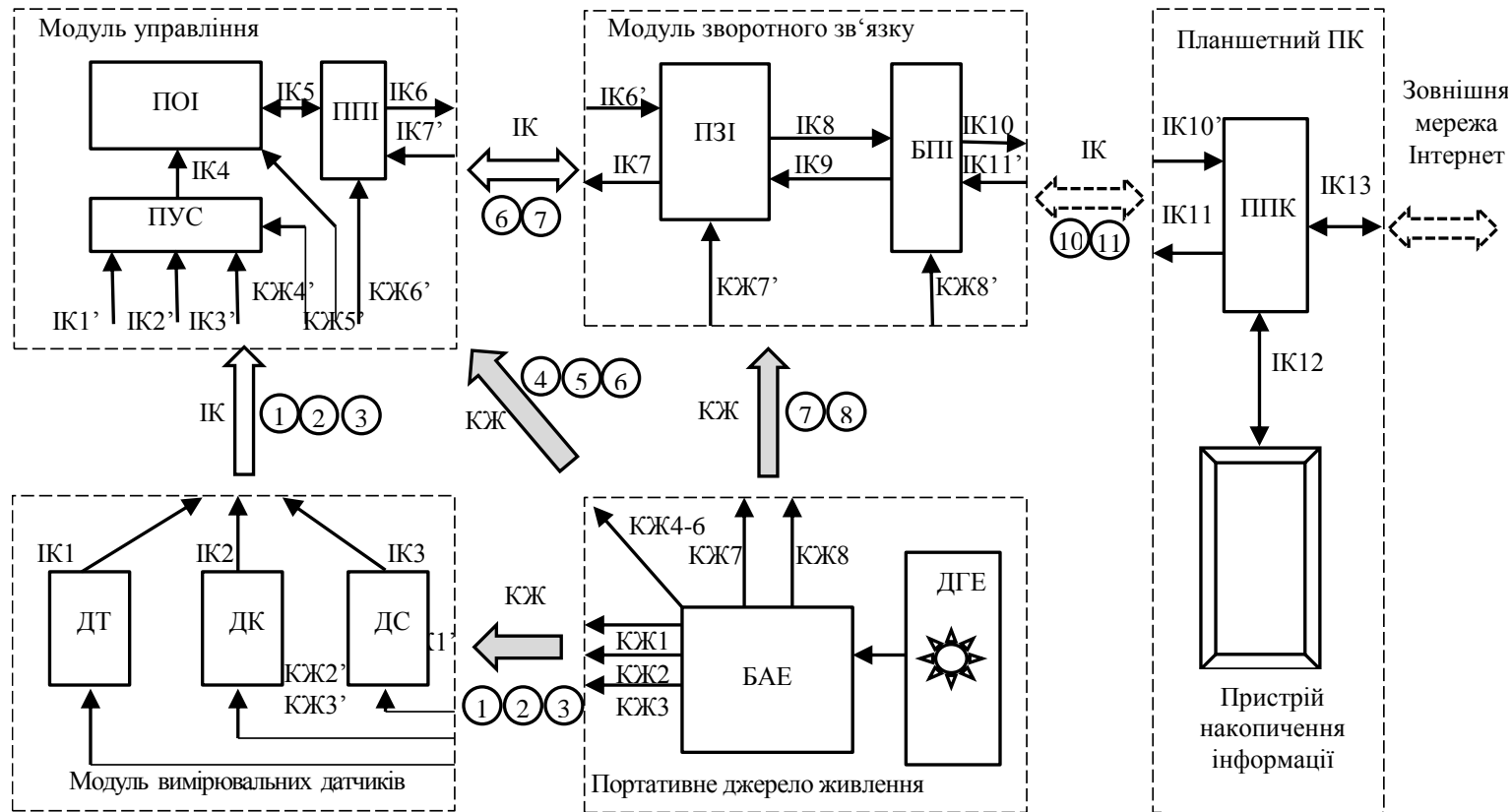


Рис. 3.8. Функціональна схема ІВС санітарного стану деревних насаджень: БАЕ – блок акумулювання енергії; ДТ – датчик температури повітря; ДК – датчик кислотності ґрунту; ДС – датчик солоності ґрунту; ДГЕ – джерело генерування енергії (наприклад, п'єзоелемент або сонячна батарея); БПІ – блок дистанційного передавання інформації; ІК – інформаційний канал; КЖ – канал живлення; ПЗІ – пристрій запиту інформації; ПОІ – пристрій попередньої обробки інформації; ППІ – пристрій передавання інформації; ПУС – пристрій узгодження сигналів

Функціональна схема розроблювальної ІВС, рис.3.8, включає в себе п'ять блоків: портативне джерело живлення, модуль вимірювальних датчиків, модуль управління, модуль зворотного зв'язку та керуючий портативний персональний комп'ютер. Призначення блоків ІВС описане далі [122, 123]:

Портативне джерело живлення є основним енергомодулем розроблювальної інформаційно-вимірювальної системи. Включає два блоки:

- необов'язковий блок ДГЕ, який подовжує термін надійної роботи вимірювального пристрою, наприклад, п'єзоелектричний елемент [122] або сонячна батарея.
- обов'язковий блок БАЕ – блок акумулювання енергії, наприклад, електролітичний конденсатор або акумуляторна батарея.

Пристрій забезпечує необхідною енергією основні модулі вимірювального блоку через канали живлення КЖ1 – КЖ8.

1. Модуль вимірювальних датчиків призначений для дистанційного збирання, оцифрування та передавання вимірюваної інформації з датчиків температури оточуючого середовища (ДТ), кислотності (ДК) та солоності (ДС) ґрунту. Передача відбувається за інформаційними каналами ІК1 – ІК3 – на модуль управління. В даному модулі не передбачений зворотній зв'язок, з огляду на необхідність спрощення схемотехнічних рішень та мінімізації енергоспоживання. Живлення пристроїв модуля здійснюється через три низьковольтні канали живлення КЖ1 – КЖ3.

2. Модуль управління використовується для проведення сканування вимірювальних датчиків та попередньої обробки вимірюваних значень. До основних вузлів блоку належать:

- пристрій узгодження сигналів (ПУС), що представляє собою комутатор інформаційних сигналів, які поступають з модулю вимірювальних датчиків;
- пристрій попередньої обробки інформації (ППОІ), на який надходить інформація про стан датчиків, що перевіряється на коректність та

працездатність, а також проводиться визначення усередненого значення вимірюваного параметру та формується 16-бітний інформаційний сигнал;

- пристрій передавання інформації (ППІ) призначений для передавання раніше сформованого сигналу через інформаційний канал зв'язку ІК6 на модуль зворотного зв'язку. З модуля зворотного зв'язку на ППІ через інформаційний канал ІК7' поступає сигнал на запит про обмін інформацією між вимірювальним блоком та ППК

Даний блок включає сім каналів зв'язку, з яких два канали для обміну з внутрішніми пристроями. Односторонній канал ІК4 для передачі узгодженого сигналу з ПУС. Двосторонній канал ІК5 – для обміну інформацією між пристроєм обробки, пристроєм передавання інформації та з зовнішніми модулями. Канали: ІК1 – ІК3 призначені для прийому сигналу з модуля вимірювальних датчиків; ІК7 – прийом запиту з модуля зворотного зв'язку. Канал ІК6 для передачі даних на модуль зворотного зв'язку.

Через низьковольтні канали живлення КЖ4 – КЖ6 здійснюється живлення пристроїв даного модуля.

3. Модуль зворотного зв'язку відповідає за організацію забезпечення безперебійного та надійного зворотного зв'язку між управляючим пристроєм та вимірювальним блоком.

Таким чином, запит на надання інформації з ППК через інформаційний канал ІК11 надходить на блок дистанційного передавання інформації (БПІ). Отриманий БПІ радіосигнал перетворюється в електричний імпульс, який через інформаційний канал ІК9 надходить в пристрій запиту інформації. Отриманий запит після опрацювання передається по каналу ІК7 на модуль управління у вигляді набору даних про запит на отримувану інформацію.

Сформована інформація з модуля управління через канал ІК6 надходить на блок передавання БПІ, де відбувається перетворення провідного сигналу у безпровідний радіосигнал. Отриманий радіосигнал в подальшому передається на керуючий ППК. Живлення пристроїв модуля відбувається за допомогою двох низьковольтних каналів живлення КЖ7 – КЖ8.



Керуючий ППК – основний елемент розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи. Даний блок призначений для узгодження роботи програмного забезпечення для визначення зон деревних насаджень відповідно до категорій СС та блоку вимірювання, який формує початкові дані, дозволяє накопичувати, обробляти, аналізувати та зберігати результати моніторингу.

Запит інформації з вимірювального блоку здійснюється безпосередньо з ППК (інформаційний канал ІК11) за допомогою безпроводних технологій (WiFi, Bluetooth та інших). Через інший безпроводний канал ІК10' здійснюється приймання отримуваної з блоку вимірювання інформації. В пристрої управління, окрім командно-управлінських функцій та функцій обміну інформацією з блоку вимірювання передбачені й інші функції. Так, за допомогою двостороннього інформаційного каналу ІК12 отримувані, оброблені та сформовані дані можуть зберігатися на зовнішньому пристрої накопичення інформації (як правило, це SSD-card). Іншим двостороннім інформаційним каналом ІК13, сформований масив даних може передаватися в мережі Internet на віддалений ("хмарний") носій, де він і буде зберігатися та використовуватися з будь-якої Інтернет-адреси, що має доступ до цієї бази даних.

Основними перевагами використання запропонованої схеми ІВС є можливість дистанційного опитування датчиків розташованих на достатньо великій території (сучасні засоби високочастотного радіозв'язку дозволяють з'єднуватися та обмінюватися інформацією між пристроями на відстані від 150 метрів до кількох кілометрів), а також можливість повної автоматизації процесу отримання, обробки та візуалізації інформації про санітарний стан деревних насаджень, що дозволяє усунути ряд зовнішніх впливів з боку оператора (ручне налаштування вимірювальної системи, введення неправдивих даних, тощо). Це, в свою чергу, дозволить уникнути систематичних методичних похибок, чим підвищити точність, швидкодію та надійність результатів дистанційного контролю.

Використання розроблювального ІВС моніторингу дозволяє зменшити час запиту та зворотного зв'язку у 3 – 4 рази. Це забезпечує вчасне корегування розрахункового рівняння та підбір найбільш оптимальних режимів роботи системи. В результаті отримуємо:

- підвищення точності на 12,5 – 15,0%;
- збільшення швидкості проведення моніторингу на 65 – 80%;
- забезпечення високої надійності роботи усіх блоків системи (ймовірність безвідмовної роботи зростає з 0,89 – 0,93 до 0,95 – 0,97).

Для збереження та накопичення отриманих результатів з їх подальшим вивченням та аналізом, ППК має дистанційне підключення за допомогою мережі Internet до зовнішнього сервера збереження даних, дистанційний доступ до якого з будь-якого ПК можливий завдяки застосуванню, наприклад, “хмарних” технологій обміну даними.

Таким чином, були визначені основні вимоги до конструкції розроблювальної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Проаналізовані результати випробувань та визначено вплив найбільш негативних факторів на працездатність, надійність та точність отриманих даних. Складені структурна та функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи, за якими розроблені практичні схемо-технічні рішення такої ІВС для дистанційного моніторингу СС ДН.

### **3.3 Програмне забезпечення системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень**

Інформаційно-вимірювальна система моніторингу – це складний інструмент для вимірювання та проведення контролю санітарного стану деревних насаджень. Збільшення можливостей такого інструменту забезпечує якісне програмне забезпечення (ПЗ).

Проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень здійснюється спеціально розробленим ПЗ, який є зручним засобом для діагностування, налаштування та попереднього оброблення отриманих результатів.

Основною особливістю розробленого програмного забезпечення є можливість формування запиту на отримання інформації з вимірювальних пристроїв, обробки, аналізу та збереження отриманих результатів. Дає можливість накопичення інформації про моніторинг.

В загальному випадку використання розробленого програмного забезпечення спрощує процес проведення моніторингу СС деревних насаджень. До переваг розроблюваного ПЗ відноситься можливість доступу до збережених даних з будь-якого ПК, який підключено до мережі Internet. З залученням розробленого програмного продукту суттєво спрощується робота оператора інформаційно-вимірювальної системи.

Слід зауважити, що ПЗ для ІВС моніторингу СС ДН спроектовано на базі об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) на мові "Delphi", яка включає в себе комбінацію з наступних найважливіших сучасних технологій:

- об'єктно-орієнтованої моделі компонентів;
- високопродуктивного компілятора в машинний код;
- можливості масштабування засобів побудови баз даних;
- побудова візуальних додатків з програмних прототипів.

Об'єкти баз даних (БД) в "Delphi" засновані на мові управління базами даних SQL і містять у собі "Borland Database Engine". "Delphi" включає також і "Borland SQL Link", що забезпечує доступ до систем управління базами даних "Sybase", InterBase", "Informix" та "Oracle" реалізується з високою ефективністю.

Стійка та надійна робота забезпечується архітектурою компілятора додатка, який створений з використанням "Delphi". Підтримка застосування вже існуючих об'єктів та динамічно приєднаних бібліотек відбувається з

допомогою “Delphi, які були написані на “C++”, “OLE”, “VBX”, об’єкти, створені с використанням “Delphi”, тощо.

Тип та місцезнаходження похибки, які виникають в програмі написаній на “Delphi”, подаються у вигляді об’єктів, які включають дані про похибку. Система опрацювання похибки може лишитись такою, що існує по замовчуванню, або використовувати власноруч написаний оброблювач.

*Структура програми управління та обробки інформації з ІВС.* В табл.3.3 представлена структура головного меню розроблювальної програми управління.

Табл. 3.3. Структура головного меню програми управління ІВС

Розділ	Підрозділи
<i>Отримання результатів</i>	<p><i>Формування параметрів запиту.</i>  Налаштування параметрів надсилання запиту на отримання результатів вимірювання  <i>Сканування.</i>  Проведення вимірювання з датчиків вимірювального блоку.  <i>Вихід.</i>  Застосовується для виходу з програми.</p>
<i>Обробка даних</i>	<p><i>Інформація про результати дослідження.</i>  Виводить результати проведеного дослідження та дає можливість збереження даних  <i>Формат збереження даних.</i>  Дозволяє обрати формат для збереження набору отриманих результатів вимірювання про кислотність, солоність та температуру оточуючого середовища.  <i>Збереження даних.</i>  Дозволяє обрати місце збереження даних  <i>Видалення даних</i>  Дозволяє видалити отримані дані моніторингу</p>
<i>Обмін даними</i>	<p><i>Вибір сервера</i>  Дозволяє обирати робочий сервер, куди будуть пересилатися отримані результати  <i>Передавання даних</i>  Дозволяє передавати отримані в результаті моніторингу дані в створену базу даних  <i>Відкриття даних</i>  Дозволяє відкривати програмою дані з бази даних.  <i>Порівняння даних</i>  Дозволяє порівнювати отримані результати моніторингу з аналогічними даними з бази даних</p>
<i>Довідка</i>	<p><i>Довідка</i>  Показує користувачу довідкову інформацію щодо роботи програми.  <i>Про програму</i>  Показує інформацію про програму та поточну версію</p>

Блок-схема розроблюваної програми управління наводиться у Додатку Е.

Основною перевагою програмної реалізації ПЗ моніторингу СС ДН на базі “Delphi” є: простота системи; легка адаптація під різноманітні системи інтерпретування (“Java”, “Builder” і т.д.) в різних ОС; можливість розвитку ПЗ в майбутньому під час адаптації його до нових Web-технологій, що підвищує точність та адаптованість ПЗ до новітніх віртуальних технологій.

Розвиток дистанційної технології передавання інформації на базі мережі Internet є надійною, як і при роботі в інтерактивному режимі так і в дистанційному режимі управління.

Основними критеріями процесу обміну даними (трафіку) прийняті наступні три характеристики:

1. Чутливість трафіку до спотворень та втрат пакетів.
2. Чутливість трафіку до можливих затримок та їх варіацій.
3. Відносна передбачуваність швидкості обміну інформацією.

*Чутливість трафіку до спотворень та втрат пакетів.* До пакетів даних, які передаються ІВС, належать: дані про температуру оточуючого середовища, солоність та кислотність ґрунту. У випадку, коли невелика кількість спотворених або відсутніх даних, які визначаються на основі раніше прийнятих даних, стійкість до витрат залежать від відсотку втрачених пакетів даних, які не можуть перевищувати 1%.

*Чутливість трафіку до можливих затримок та їх варіацій.* Система передачі даних в ІВС за чутливістю до затримок пакетів відноситься до трафіку даних. У випадку, коли затримки при обміні даними цієї категорії можуть мати будь-які значення та досягати кількох мілісекунд. Смуга пропускання для трафіку важливіша за час затримки. Зменшення часу передачі даних пов'язане зі збільшенням пропускну здатності мережі.

*Відносна передбачуваність швидкості обміну інформацією.* Трафік даних ІВС відноситься до потокового. В процесі обміну рівномірним

потокотом інформації, яка з постійною бітовою швидкістю надходить в мережу.

На базі залежності працездатності трафіку даних від затримки пакетів, системи обміну інформацією для ІВС належать до ізохронних систем. Перевищення часу затримки процесу обміну даними в подібних системах спотворює весь пакет даних при передачі.

*Потоки пакетів даних для систем ІВС в мультисервісних мережах.* Трафік даних ІВС в пакетних мультисервісних мережах зв'язку суттєво відрізняються від моделі пуассонівського потоку. Розподіл інтервалу часу описується експоненціальною функцією між моментами надходження пакетів. Послуги передачі даних з ІВС забезпечуються мережевими додатками і наданими мережею запитами.

Джерела запитів, які приймають участь при створенні потоку пакетів, який суттєво відрізняється фактичними значеннями питомого інтенсивного навантаження.

В залежності від додатків, якими обслуговуються джерела запитів та співвідношень їх чисельності для додатків, змінюється інтенсивність навантаження результуючого потоку пакетів. Технологічні особливості використовуваних алгоритмів обслуговування здійснюють вплив на структуру трафіку. Забезпечення якості обслуговування певного рівня вимагають потоки різних даних, оскільки, пакетний трафік є різномірним.

В таких умовах за забезпечення передачі потоків всіх даних відповідає єдина мультисервісна мережа з законами управління та загальними протоколами. Таким чином, різні джерела мають різні швидкості передачі даних. Швидкість може змінюватись в процесі сеансу зв'язку (максимальна та середня швидкість). Через це об'єднаному потоку властива берстність (пачковість) трафіку з випадковою тривалістю піків навантаження та періодичністю.

При використанні програми-аналізатора трафіку "Wireshark" (розробник: "The Wireshark team") на протязі 15 хвилин проаналізовано

мережевий трафік передачі інформації у розроблюваній в даному дисертаційному дослідженні системі моніторингу ІВС даних.

“Wireshark” працює на базі бібліотек “Pcap” (Packet Capture) та надає можливість створення програми аналізу мережевих даних та поступають на спеціальну мережеву карту ПК. Також користувачу програма дозволяє фільтрувати дані, сортувати та переглядати увесь трафік, який проходить крізь мережу в режимі реального часу.

Протягом всього часу сенсу зв'язку ( $T_c = 899,42$  с) триває процес передачі даних. Стохастичний процес передачі даних відповідно до рекомендації ІТУ-Т 1.311 можна охарактеризувати піковою (максимальною) бітовою швидкістю (3.1).

$$V_p = \max b(t) \quad (3.1)$$

При врахуванні емпіричних даних:  $V_p = 8866$  біт/с

За (3.2) визначається середня бітова швидкість передачі даних:

$$V_m = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} B(t) dt . \quad (3.2)$$

де,  $V_m = 6326$  біт/с.

Коефіцієнт берстності (пачковості) визначається співвідношенням пікової та середньої швидкостей:

$$K = V_p/V_m = 8866/6326 = 1,4. \quad (3.3)$$

Автором дисертаційного дослідження проводилася атестація мережевого каналу розроблюваної ІВС моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Таким чином, для атестації проводилось 12 вимірювань швидкості мережевого каналу. Відповідні значення вимірювань представлені в табл. 3.4:

Табл. 3.4. Результати вимірювань швидкості мережевого каналу

№ вимір.	Результат	№ вимір.	Результат	№ вимір.	Результат
1	12,8 мс	5	15,5 мс	9	19,0 мс
2	15,6 мс	6	14,4 мс	10	18,4 мс
3	17,3 мс	7	17,8 мс	11	18,6 мс
4	13,2 мс	8	14,3 мс	12	21,1 мс

При цьому нормативне значення швидкодії:  $\tau_0 = 15$  мс, а довірча ймовірність вимірювань приймалась  $P = 0,99$ .

На базі даної гіпотези:

$$H_0: \bar{x} = \tau_0; \quad H_1: \bar{x} > \tau_0,$$

Критерій гіпотези має вигляд:

$$\hat{T} = \frac{\bar{x} - \tau_0}{\frac{S_n}{\sqrt{n}}},$$

Розрахунки проводили  $n = 12$  вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

що дало встановити наступне:

$$\bar{x} = 16,5.$$

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 2,583 \text{ c};$$

$$T = 2,012 \text{ c}.$$

В даному випадку обиралася одностороння критична область  $K: |t| \geq t$ .

По таблиці розподілу Стьюдента, зі співвідношення  $P\{|\hat{T}| < t\} = 1 - \alpha$  визначимо  $t$ . При числі ступенів свободи  $k = n - 1 = 11$  та ймовірності  $P = 0,99$ , отримаємо значення  $t = 2,718$ .

Таким чином, оскільки  $(2,012 < 2,718)$ , то гіпотеза  $H_0$  приймається. Оскільки, виміряне значення швидкодії трафіку менше за нормативне, що підтверджує працездатність інформаційно-вимірюваної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

*Дослідження мережевого трафіку.*

На специфічну природу в мережах передачі даних з інформаційно-вимірювальної системи вказують аналіз вимірів інформаційних потоків на



пакетному рівні та результати експериментальних досліджень. Дані ІВС не належать до традиційних меж відомих випадкових моделей.

#### *Оцінка статистичних характеристик мережевого трафіку.*

Для проведення оцінки статистичних характеристик розподілу пакетів даних з ІВС, між отриманими пакетами обчислюються інтервали.

Проведене дослідження інтервалів пакетів даних інформаційно-виміральної системи підтверджує: масштабну інваріантність (самоподібність); можливість вивчення питання обробки та передачі інформації з використанням фрактальних алгоритмів в майбутньому, які не належать до задач даного дослідження.

Так для процесу автоматизації ІВС використовується розроблення програмно-математичного та апаратного забезпечення для проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень, які дозволяють мінімізувати вплив оператора на точність та надійність отримуваних результатів з можливістю проведення віддаленого моніторингу.

### **3.4 Похибки визначення параметрів автоматизованого моніторингу санітарного стану деревних насаджень**

Шляхом визначення сумарної похибки характеристик компонентів автоматизованої ІВС підтверджується факт підвищення точності отриманих результатів. Так автором дисертаційного дослідження встановлені основні причини утворення та походження окремих складових частин похибки, Додаток Є.

Після проведення чисельних розрахунків було обраховане значення загальної похибки для випадку проведення моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Така похибка становила  $\delta_{\Sigma} = 3,1\% < 5\%$ , що відповідає вимогам стандарту ISO 5725-1/6:2015 “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results”.

Так доведено, що удосконалення апаратно-методичної бази та інструментального забезпечення призводить до покращення ефективності процесу моніторингу.

### **3.5 Висновки до розділу 3**

Наведено технологічні особливості виготовлення мікросенсорів, які використовуються для визначення якісних показників деревного соку: кислотності, цукровості та в'язкості.

Визначено вимоги до конструкції розроблювальної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

Проаналізовано експериментальні результати та визначено вплив зовнішніх факторів на працездатність, надійність та точність отриманих даних.

Складено структурну та функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи моніторингу, на основі яких проведено схемотехнічне розроблення такої ІВС.

Розроблено програмне забезпечення для проведення автоматичного моніторингу санітарного стану деревних насаджень. Таке програмне забезпечення дозволяє зменшити вплив оператора на процес моніторингу та дозволяє проводити віддалений (дистанційний) моніторинг та прогнозування результатів визначення СС ДН.

Визначено, що удосконалення інструментальної та апаратно-методичної бази призводить до покращення ефективності (підвищення точності та надійності) процесу моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

## РОЗДІЛ 4

### РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ ТА ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

В розділі здійснено експериментальне випробування розробленої інформаційно-вимірювальної системи та проведено порівняння експериментально отриманих результатів з даними математичного моделювання [114, 115]. Представлені наочні результати моніторингу досліджуваної ділянки (на прикладі парку «Спортивний», м. Черкаси) та наведено результати візуального зонування отриманих даних за категоріями санітарного стану [26].

Наведені результати розрахунку точності, надійності (вірогідності отримання коректних даних приладом управління) та швидкодії передачі/приймання інформації для різних досліджуваних ділянок та отримання графіків змінення цих параметрів від положення оператора з пристроєм управління відносно датчиків [115 – 123].

Наведені результати впровадження у лісове господарство та застосування в наукових дослідженнях розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу СС деревних насаджень [121].

#### **4.1 Експериментальне випробування інформаційно-вимірювальної системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень**

Експериментальне випробування розробленої інформаційно-вимірювальної системи проводилось на території м.Черкаси на трьох досліджуваних ділянках на території парку «Спортивний» з різною концентрацією дерев усіх категорій санітарного стану протягом 2018 – 2020 років. Загальні параметри та санітарні характеристики таких ділянок представлені в таблиці 4.1 [114, 115].

Табл. 4.1. Загальні параметри досліджуваних ділянок

Параметри	Ділянка № 1			Ділянка № 2			Ділянка № 3		
Площа	63 кв. м			65 кв. м			78 кв. м		
Кількість дерев	45			51			62		
Санітарний стан дерев в контрольних точках деревних насаджень у 2018 році	2	2	1	2	4	3	2	2	4
	2	3	1	2	2	3	3	2	3
	2	1	1	3	4	2	2	2	4
Санітарний стан дерев в контрольних точках деревних насаджень у 2019 році	2	3	2	2	4	4	3	4	5
	2	4	2	3	2	3	3	4	5
	3	2	3	4	5	3	4	3	5
Санітарний стан дерев в контрольних точках деревних насаджень у 2020 році	3	4	4	2	5	4	5	5	6
	3	5	2	4	3	4	5	6	5
	3	3	4	5	5	4	5	4	5

Для зручності спостереження кожному контрольному дереву присвоювалося певне кодування, відповідно до схеми наведеної на рис.4.1.

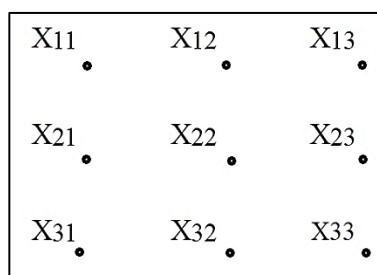


Рис. 4.1. Схема присвоєння кодів для кожного контрольного дерева

Моніторинг санітарного стану проводився в першій половині лютого 2018 – 2020 років, оскільки в цей період відсутні активні біологічні процеси, що відбуваються в сосні.

В результаті проведених досліджень спостерігалось щорічне зміння санітарного стану (як правило, в сторону погіршення), як контрольних дерев, так і основної маси деревних насаджень.

Так, на рис.4.2 – 4.4 наведено графік зміни категорій санітарного стану контрольних дерев на досліджуваних ділянках за період з 2018 по 2020 роки.

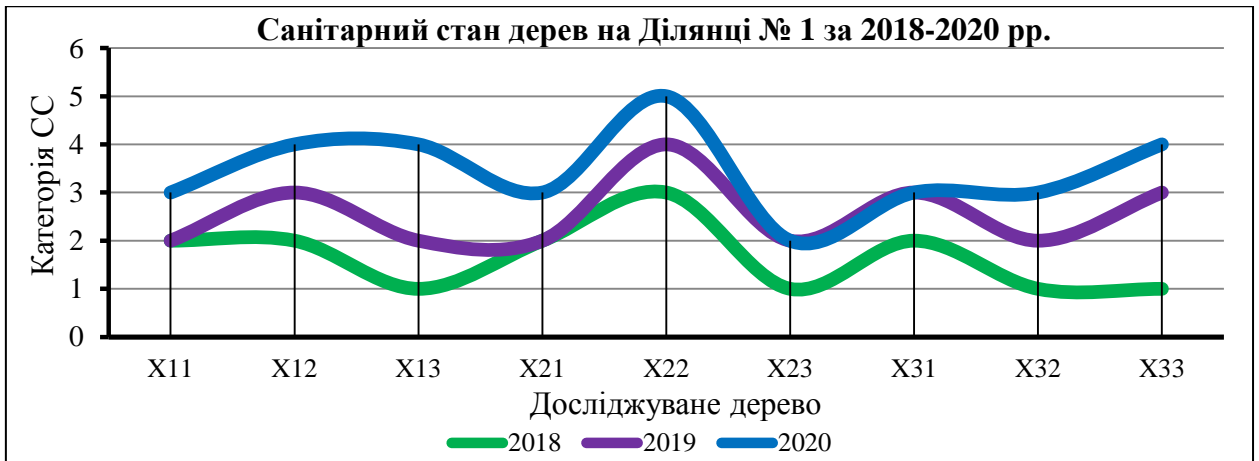


Рис. 4.2. Графік зміни категорій СС контрольних дерев (згідно кодової назви) на ділянці №1 за період з 2018 по 2020 роки

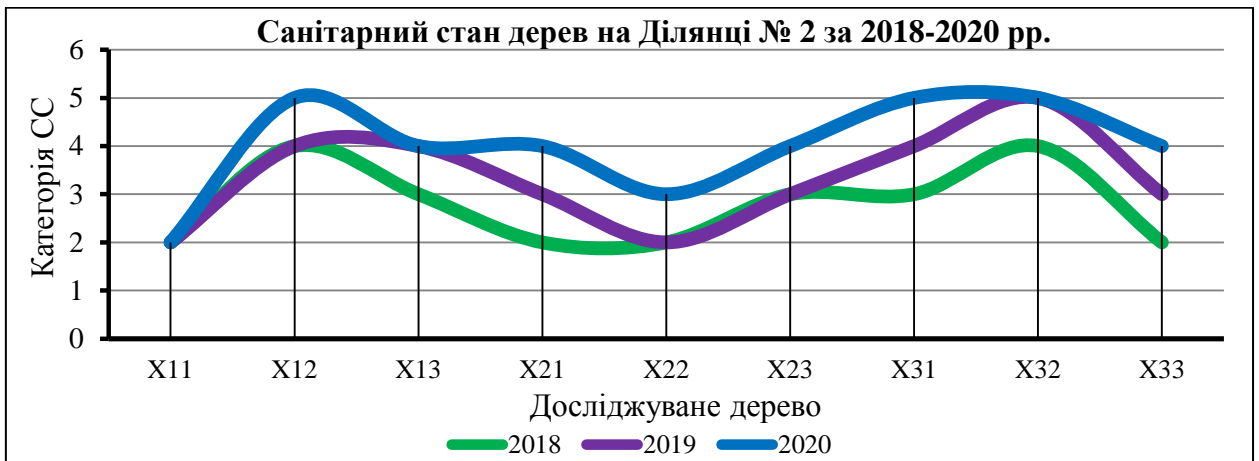


Рис. 4.3. Графік зміни категорій СС контрольних дерев (згідно кодової назви) на ділянці №2 за період з 2018 по 2020 роки

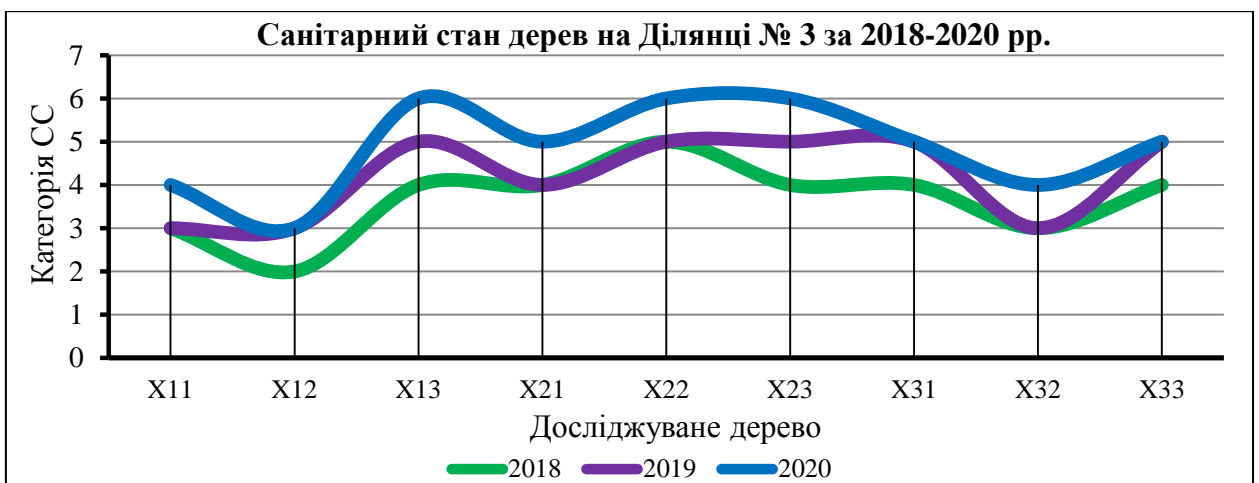


Рис. 4.4. Графік зміни категорій СС контрольних дерев (згідно кодової назви) на ділянці №3 за період з 2018 по 2020 роки

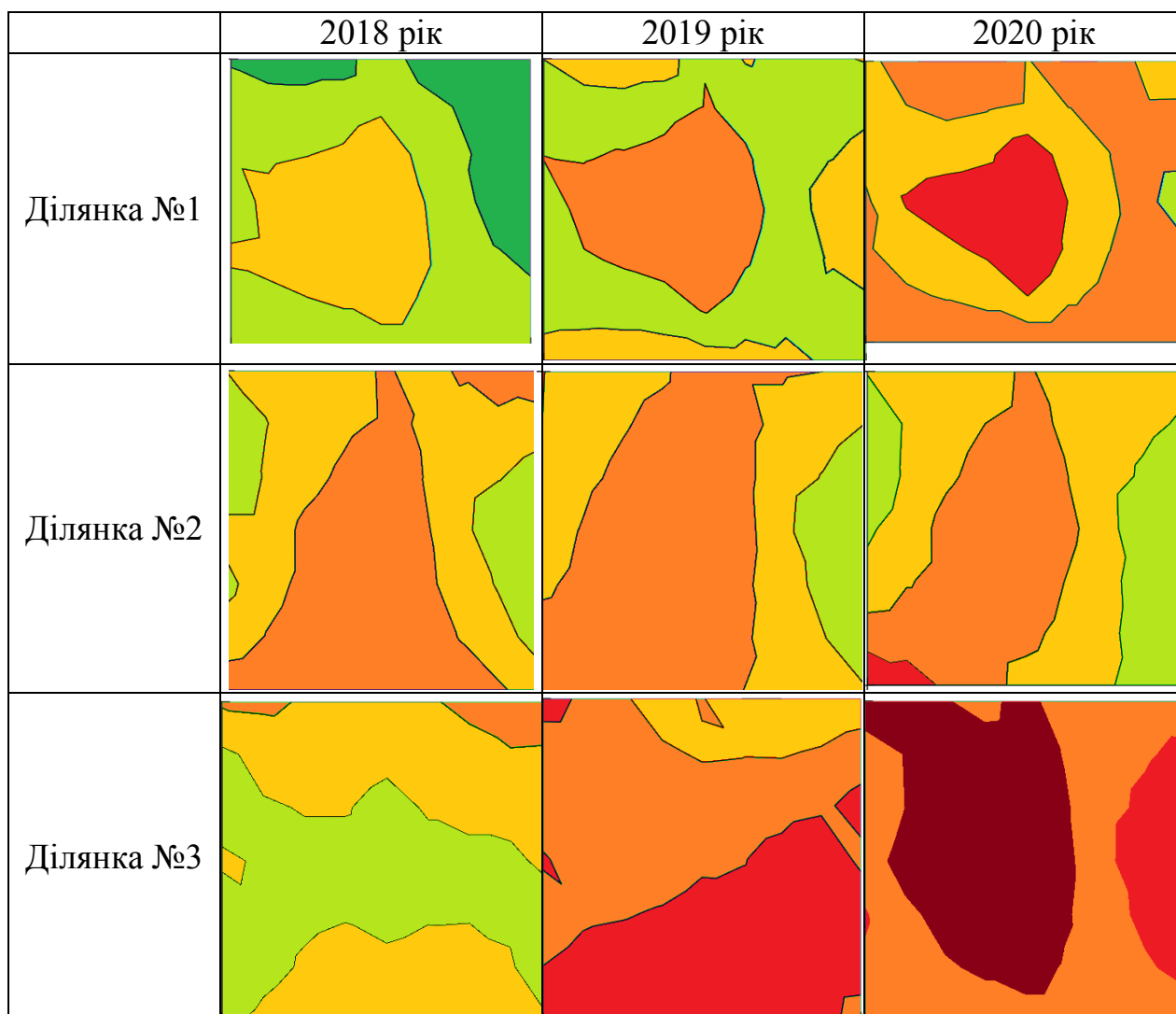
Проаналізувавши графіки (рис.4.2 – 4.4) було встановлено наступне. Протягом двох років дослідження, санітарний стан контрольних дерев погіршувався в основному на 1 – 3 одиниці показника категорії (на ділянці №1), на 0 – 2 одиниці показника категорії (на ділянці №2), на 1 – 2 одиниці показника категорії (на ділянці №3). При цьому, слід зауважити, що, чим вищій категорії відповідав СС контрольного дерева, тим меншим змінам цього стану з часом піддавалося дерево. На думку автора, це може бути пов'язано з тим фактом, що у здорового дерева (з нижчою категорією СС) спостерігається пришвидшений обмін речовин та сокорух загалом. Відповідно, руйнівні зміни, що відбуваються в такому дереві проявляються швидше. В той же час, у дерев ослаблених та пошкоджених швидкість обмінних процесів відбувається повільніше, що й призводить до більш сповільнених змін в них.

#### **4.2 Порівняння результатів експериментальних випробувань з даними статистичних досліджень**

Після проведення розрахунків відповідно до алгоритму, описаного в п.2.3, були побудовані карти зонування за категоріями санітарного стану деревних насаджень, а також діаграми розподілу дерев за категоріями санітарного стану відповідно для кожної досліджуваної ділянки. Усі отримані дані представлені в табл. 4.2 та табл. 4.3 [114].

Як можна побачити з нижченаведених карт зонування та діаграми розподілу ДН за категоріями СС, для усіх ділянок (1 – 3) спостерігається наступна ситуація. З кожним наступним роком спостерігається збільшення ділянки ДН, що мають гіршу категорію санітарного стану. При цьому, проаналізувавши графіки в табл. 4.3, можна дійти висновку, що зміна розподілу ДН на обраних ділянках з часом відбувається за квадратичним законом розподілу, що має бути враховано при подальшому прогнозуванні змін розподілу ділянок ДН за санітарним станом.

Табл. 4.2. Побудовані в результаті математичного моделювання карти зонування санітарного стану

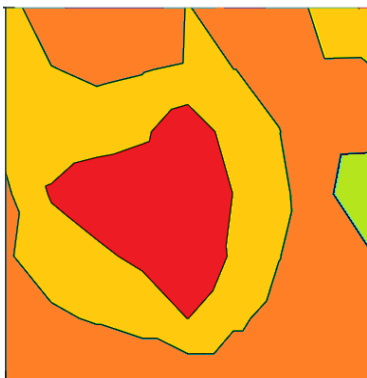
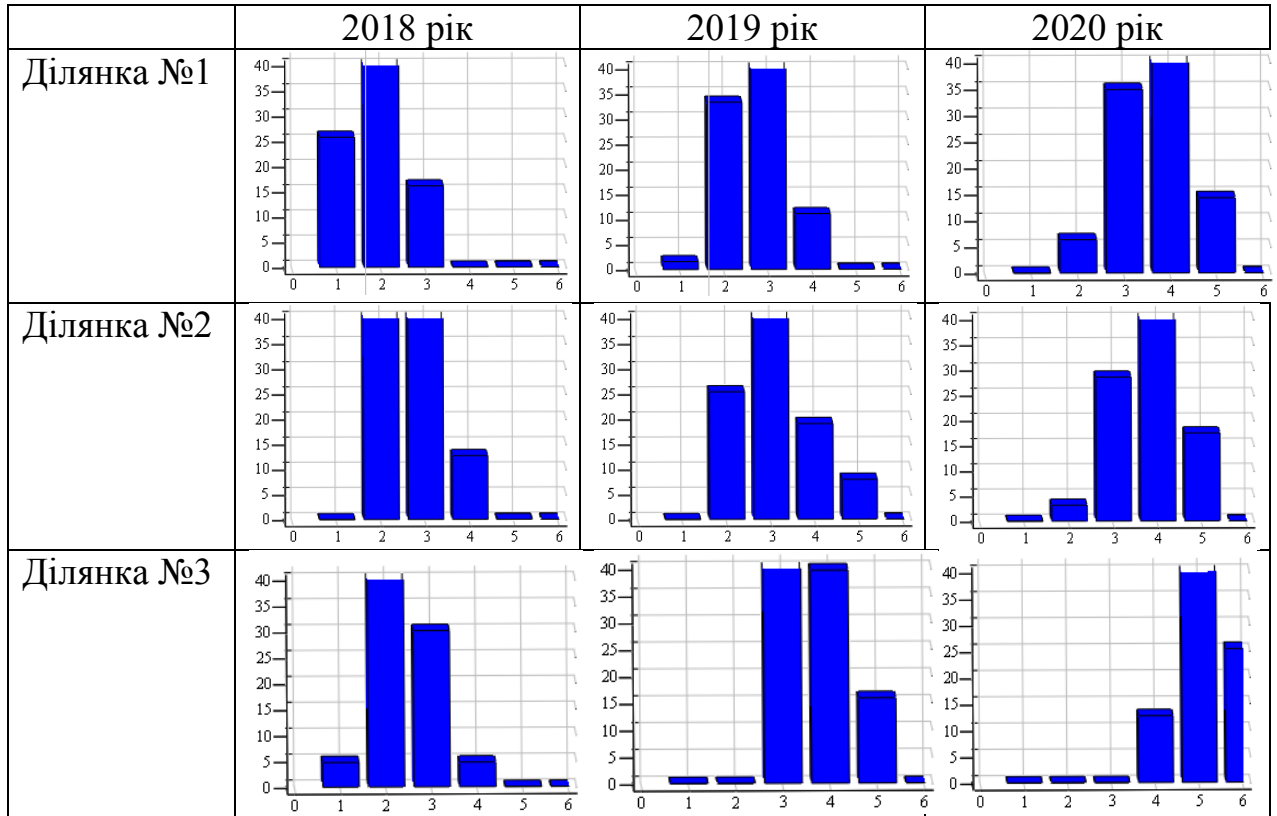


В той же час, як можна побачити при накладанні результатів зонування із супутниковими знімками реального стану деревних насаджень (на прикладі ділянки №1), у лютому 2020 року, рис. 4.5, спостерігається прямий сильний кореляційний зв'язок (показник кореляції,  $r = 0,87$ ) між даними математичного моделювання та результатами експериментальних візуальних досліджень, що доводить високу достовірність результатів такого моделювання.

Таким чином, було проведено експериментальне випробування розробленої інформаційно-вимірювальної системи на трьох ділянках парку «Спортивний» в м.Черкаси. Представлено результати математичного

зонування, а також отримані діаграми розподілу за категоріями санітарного стану відповідно до кожної ділянки.

Табл. 4.3. Діаграми розподілу дерев за категоріями санітарного стану



а.



б.



в.

Рис. 4.5. Порівняння результатів зонування дослідної ділянки №1 з деревними насадження у лютому 2020 року: а – зонування за даними математичного моделювання; б – зонування за супутниковими даними; в – результати накладання модельованих та експериментально отриманих даних



### **4.3 Дослідження ефективності (точності, надійності та швидкодії) розробленої інформаційно-вимірювальної системи для дистанційного моніторингу санітарного стану масивів деревних насаджень**

Дослідження ефективності (точності, надійності та швидкодії) розробленої інформаційно-вимірювальної системи для дистанційного моніторингу санітарного стану масивів деревних насаджень проводилося на контрольних ділянках 1 – 3 ДН. Адекватність отримуваних метрологічних характеристик підтверджувалася шляхом порівняння результатів вимірювання цих характеристик за допомогою розробленої ІВС з результатами, отриманими методом візуального нагляду (Додаток А).

Контроль точності проводився за методикою наведеною в Додатку Є за даними отриманими на контрольних ділянках 1 – 3. Контроль надійності результатів вимірюваних показників (температури оточуючого середовища, кислотності та солоності ґрунту) шляхом проведення 20 вимірювань на глибині 150 мм та на відстані від досліджуваного дерева 128 мм. Після цього визначається середньоквадратичне відхилення відповідно до кожного окремо взятого показника ( $pH_g \pm 0,5$  у.о.,  $Sol \pm 10$  ppm,  $T \pm 0,05$  °C).

Контроль відтворюваності результатів моніторингу СС деревних насаджень шляхом визначення ступеню розбіжності результатів моніторингу із застосуванням розробленого комплексного методу та даних отриманих в результаті математичного моделювання.

Контроль повторюваності категорії СС проводився шляхом проведення вимірювань якісних показників деревного соку досліджуваного дерева із визначеною категорією СС.

Надійність результатів вимірювання розраховувалась так:

1) Відповідно до технології процесу моніторингу санітарного стану деревних насаджень з використанням розробленої ІВС складено структурну схему (рис.4.6).

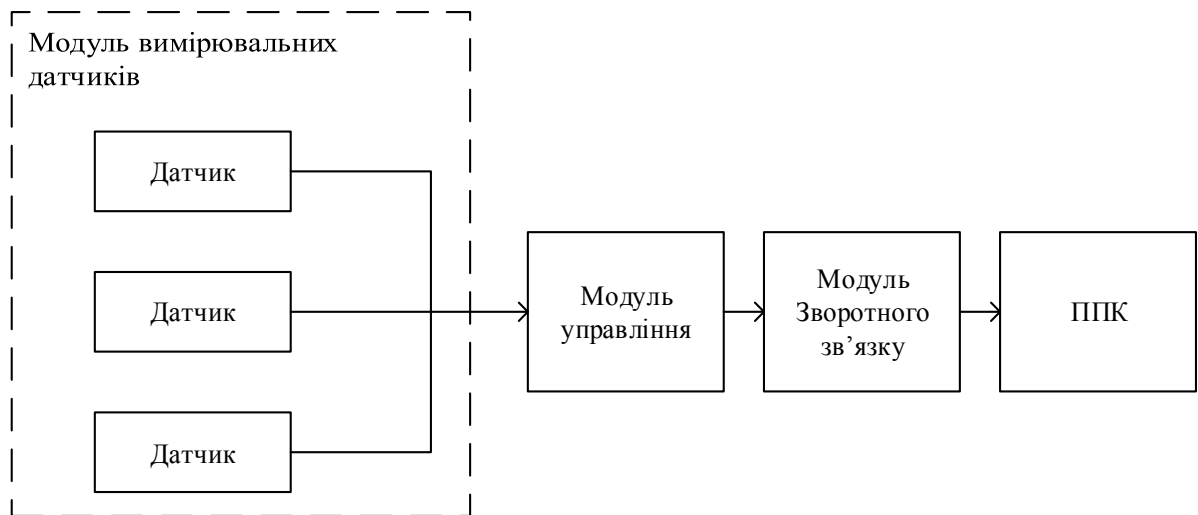


Рис. 4.6. Структурна схема роботи ІВС для моніторингу СС ДН

2) Імовірність безвідмовної роботи основних блоків складає: вимірювальних датчиків  $P(t)_1 = 0,99$ , модуля управління  $P(t)_2 = 0,995$ , модуля зворотного зв'язку  $P(t)_3 = 0,98$  та ППК  $P(t)_4 = 0,98$ . За цими даними визначаємо надійність результатів:

$$P_c(t) = \left( \sum_{i=2}^n \frac{3!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot P(t)_1^i \cdot (1 - P(t)_1)^{n-1} \right) \cdot P(t)_2 \cdot P(t)_3 \cdot P(t)_4 \quad (4.1)$$

$$P_c(t) = 0,954$$

Результати проведення оцінки метрологічних характеристик процесу моніторингу ділянки ДН за категоріями СС наведені в табл. 4.4 та дозволяють зробити висновок щодо їхньої достатньої точності (відносна похибка не перевищує 5%) і надійності (ймовірність безвідмовної роботи ІВС моніторингу не менше 0,95).

Зміна точності та надійності даних моніторингу СС ДН на розроблюваній ІВС в залежності від терміну експлуатації вимірювальних датчиків та щільності деревних насаджень наведена на рис.4.7 – 4.8 [121, 123].

Як видно з рис. 4.7, як точність, так і надійність даних моніторингу СС ДН зменшуються з часом експлуатації вимірювальних датчиків. При цьому, якщо надійність отримуваних даних за весь термін експлуатації таких датчиків (порядку 3 років) зменшувалася не суттєво (порядку на 0,2 – 0,6%), їх точність зменшувалася за параболічним законом на 2,5 – 4,3%.

Таблиця 4.4. – Результати оцінки точності, надійності та відтворюваності даних моніторингу СС ДН з використанням розробленої ІВЧ

Параметр	Похибка результатів вимірювання, %	Надійність, к-сть циклів надійної експлуатації	Похибка відтворюваності результатів, %	Похибка повторюваності результатів, %
рН ґрунту	4,5	0,954; 33 450	4,8	2,0
Солоність ґрунту	4,8	0,954; 33 450	2,4	0,5
Температура НС	4,6	0,954; 33 450	4,8	0,7

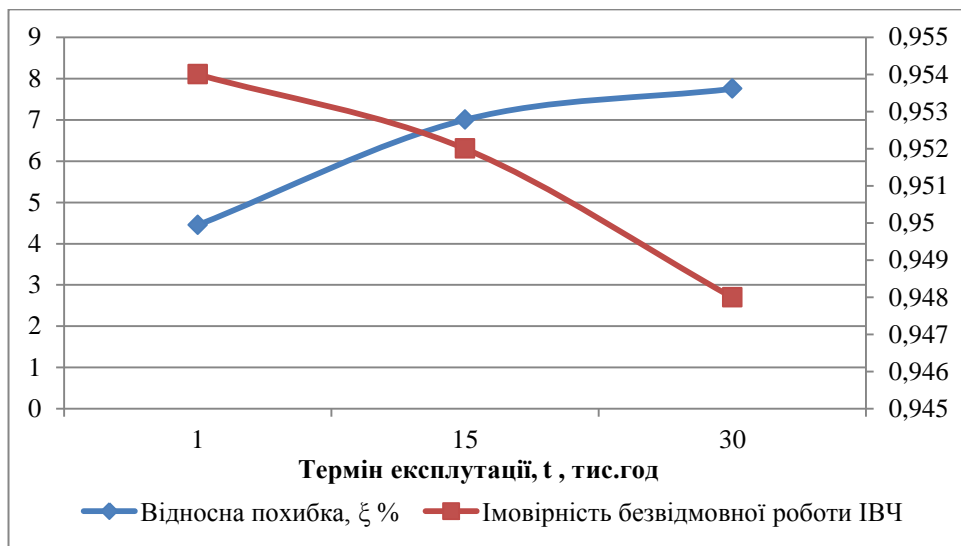


Рис. 4.7. Залежність точності (1) та надійності (2) даних моніторингу СС ДН від терміну експлуатації ( $t$ , год) вимірювальних датчиків

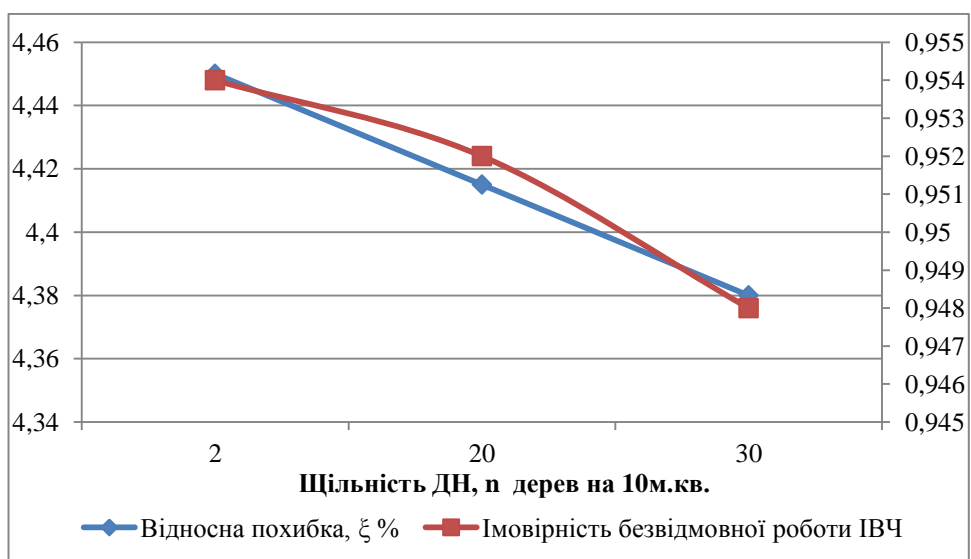


Рис. 4.8. Залежність точності (1) та надійності (2) даних моніторингу СС ДН від щільності деревних насаджень ( $n$ , дерев на  $10 \text{ м}^2$ )

В той же час (рис. 4.8) точність моніторингу СС деревних насаджень зі збільшенням їх щільності збільшується майже лінійно на 1,2 – 1,5% (при збільшенні щільності у 2,5 рази), тоді, як надійність цих даних зменшується з 0,954 (ймовірність безвідмовної роботи ІВС) для мінімального значення розглядуваного діапазону щільностей ДН до 0,948 – для максимального значення, що доводить неможливість адекватного отримання даних з вимірювальних датчиків при високій захаращеності досліджуваної ділянки ДН, тоді, як на точність отримуваних результатів, щільність деревних насаджень майже не впливає.

З іншого боку, дослідження, що проводилися на ділянках зі свіжозрубаними деревами дозволили з достатньою точністю (відносна похибка не перевищувала 7,5%) визначати санітарний стан цих дерев, що може бути використано при моніторингу незаконних вирубок деревних насаджень.

В таблиці 4.5 представлені точність, надійність та швидкодія результатів моніторингу санітарного стану деревних насаджень, отриманих розробленою інформаційно-вимірювальною системою на різних дослідних ділянках.

Табл. 4.5. Результати розрахунку точності, надійності та швидкодії результатів моніторингу

Параметр	Ділянка №1	Ділянка №2	Ділянка №3
Точність (відносна похибка), %	4,2	4,8	4,4
Надійність (ймовірність безвідмовної роботи ІВС)	0,958	0,96	0,953
Швидкодія, мс	0,509	0,461	0,311

Таким чином, в результаті дослідження ефективності розробленої інформаційно-вимірювальної системи встановлено, що така ІВС має високу точність (відносна похибка не перевищує 5%), надійність (ймовірність безвідмовної роботи ІВС моніторингу не менше 0,95) та швидкодію (час між запитом та отриманою адекватною відповіддю між пристроєм управління та

вимірювальним датчиком не перевищує 0,31 – 0,51 мс), що доводить адекватність та доцільність її використання для дистанційного моніторингу санітарного стану масивів деревних насаджень.

#### **4.4 Рекомендації щодо застосування розробленої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень**

Основні результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані у муніципальному та лісовому господарствах для автоматизації процесу визначення санітарного стану дерев та вчасного проведення санітарно-оздоровчих заходів. Зокрема, розроблена ІВС дозволяє проводити швидке та дистанційне визначення проблемних ділянок із зазначенням категорій санітарного стану деревних насаджень.

Для широкого застосування результатів дисертаційної роботи на практиці рекомендується:

1. Обирати досліджувані дерева на відносно однаковій відстані одне від одного для отримання більш рівномірної картини розподілу дерев за санітарним станом на даній ділянці.

2. Для усунення похибок вимірювання необхідно перед початком дослідження та після 2-3 циклів вимірювання проводити перевірку та автокалібрування вимірювальних датчиків ІВС.

Окремі результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету за спеціальностями 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» під час проведення практичних і лабораторних робіт з дисциплін: «Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин», «Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних

факторів», «Інтелектуальні технології вимірювання», «Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи» (додаток Ж).

#### **4.5 Висновки до розділу 4**

1. Проведено експериментальне випробування розробленої в дисертаційному дослідженні інформаційно-вимірювальної системи моніторингу СС ДН та здійснено порівняння експериментальних результатів з даними, отриманими в процесі математичного моделювання.

2. Наведено результати розрахунку точності, надійності (вірогідності отримання коректних даних приладом управління) та швидкодії передачі/приймання інформації з вимірювальних датчиків приладом управління для різних досліджуваних ділянок та отримані залежності цих метрологічних характеристик від терміну експлуатації вимірювальних датчиків та щільності деревних насаджень.

3. Наведено результати впровадження у навчальний процес результатів наукових досліджень розробленої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача підвищення точності та надійності визначення санітарного стану масивів деревних насаджень шляхом упровадження методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в цілому представляє собою інформаційно-вимірювальну систему дистанційного моніторингу цих насаджень за категоріями санітарного стану та має важливе практичне значення для лісового та паркового господарства, що повністю відповідає поставленій меті.

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

1. Проаналізовано існуючі методи та засоби вимірювання характеристик санітарного стану деревних насаджень, виявлені їх недоліки та обґрунтовані шляхи підвищення ефективності (точності та надійності) визначення факторів впливу оточуючого середовища на такі насадження, а також точності та оперативності визначення категорій санітарного стану таких насаджень, внаслідок чого встановлена необхідність розробки інформаційно-вимірювальної системи дистанційного моніторингу санітарного стану деревних насаджень у лісових, садово-паркових та муніципальних зонах, що лягло в основу даного дисертаційного дослідження.

2. Підвищено адекватність та оперативність оцінювання санітарного стану деревних насаджень шляхом розробки нового методу автоматизованого визначення санітарного стану дерев, який полягає у контактному вимірюванні основних показників деревного соку та враховує вплив факторів зовнішнього середовища на ці показники і, на відміну від існуючих, дозволяє дистанційно і оперативно проводити високоточне (відносна похибка не перевищила 2-3%) зонування деревних насаджень за категоріями їх санітарного стану з можливим прогнозуванням динаміки змінення меж цих зон в часі (узгодження прогнозованих даних з отриманими візуальним методом даними за результатами ГІС ДЗЗ має прямий сильний

кореляційний зв'язок з показником кореляції,  $r = 0,87$ ).

3. Розроблено комплекс оригінальних авторських методик для визначення впливу факторів зовнішнього середовища на санітарний стан деревних насаджень, що включає: методику визначення показників  $pH$  та солоності ґрунту в зоні кореневого живлення дерева, методику експрес-визначення якісних показників деревного соку, і застосування яких дозволило дистанційно та без застосування складного та дороговартісного обладнання і матеріалів отримувати значення цих показників з відносною похибкою, що не перевищує 3,5%.

4. Вперше розроблена математична модель залежності основних показників деревного соку від факторів зовнішнього середовища, яка представляє собою систему рівнянь регресії, і на відміну від існуючих використовує масив чисельних показників факторів підвищеної інформативності, що дозволяє забезпечити прийнятну адекватність класифікації санітарного стану дерев та автоматизувати процес визначення їх категорій. Відносна кількість правильно класифікованих категорій санітарного стану дерев склала близько 92%.

5. Створено алгоритм та програмно реалізовано багат шарову математичну модель, яка представляє собою поєднання нейромережі та системи регресійних рівнянь і, на відміну від існуючих, використовує алгоритм Мандамі та центроїдний метод дефазифікації. На базі зазначеної моделі сформовано набір правил класифікування дерев за санітарним станом в системі моніторингу, що забезпечує здатність визначити граничні значення факторів для цих правил (показників кислотності  $pH_g = 4,8 - 6,5$  у.о., солоності  $Sol = 505 - 823$  ppm ґрунту та температури оточуючого середовища  $T = 7,3 - 22,3$  °C), вихід за межі яких погіршує санітарний стан деревних насаджень (в середньому – на 1 – 3 бали категорії СС), а також дозволяє підвищити точність отриманих результатів (зменшити відносну похибку визначення СС максимально до 2 – 3%).

6. Вперше запропоновано принципово нову конструкцію мікросенсору для високоточного і надійного визначення якісних показників (показника  $pH$ ,



цукровості, в'язкості) деревного соку, що відповідає основним вимогам дешевизни, простоти та безпеки його використання для визначення санітарного стану дерева. Запропонована перспективна технологія виготовлення корпусу сенсорної частини пристрою шляхом 3D-друку з віскозного волокна, що забезпечує його повне саморозкладання з часом та подальше заживлення місця імплантації сенсору. За такою технологією отримано та апробовано модельні зразки вимірювальних мікросенсорів, що показали високу ефективність та надійність працездатності протягом 36 місяців.

7. Розроблена прогнозна модель зонування деревних насаджень за категоріями санітарного стану з часом, яка разом з розробленим методичним, математичним, технічним та програмним забезпеченням представляє інформаційно-вимірювальну систему, практичне використання якої дозволило проводити в режимі реального часу моніторинг санітарного стану деревних насаджень, а також: підвищити точність вимірювання на 12,5 – 15,0%, збільшити швидкість проведення моніторингу на 65 – 80% та забезпечити високу надійність роботи усіх блоків системи (ймовірність безвідмовної роботи зростає з 0,89 – 0,93 до 0,95 – 0,97), а також підвищити точність прогнозування на 4 - 6% та збільшити прогнозний період з 3 - 5 до 8 - 10 років.

8. Отримані наукові результати знайшли апробацію у лісових господарствах Черкаської області, що дозволило з високою швидкістю (час кваліфікування ділянки лісового насадження в 1 га за категоріями санітарного стану не перевищував 15-18 хв.), точністю (похибка визначення дерев за категоріями санітарного стану не перевищувала 4,5%) та надійністю (ймовірність узгодження результатів моніторингу з реальними даними не менше 0,97) визначати санітарний стан деревних насаджень. Окремі результати дисертації впроваджені у навчальний процес Черкаського державного технологічного університету.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. “Чому в насадженні з’являються випадки (мертві дерева),” *Український фруктовий портал* [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.fruit.org.ua/index.php/component/content/article/93-ua-kontent/sluzhebnye-stati/507-kistochkovi-virishennya-problem-kistochkovikh-kultur>. Дата звернення: 21.12.2019.

2. В. Олійник, та Р. Вітер, *Лісознавство: курс лекцій*. Івано-Франківськ, Україна: Симфонія форте, 2011.

3. І. О. Бобров, “Чому всихають соснові ліси,” *Державне агентство лісових ресурсів України*. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art\\_id=195324&cat\\_id=32888](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=195324&cat_id=32888). Дата звернення: 20.12.2019.

4. **A. Toptun**, and Yu Bodarenko “Negative factors affecting the sanitary status of tree plants and effective approaches to their research”, *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. vol. 66, no 1, pp. 42-45, 2020.

5. В. Мєшкова, “Всихання соснових насаджень. Причини та наслідки,” *Деревообробник - портал derevoobrobnyk.com*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://derevoobrobnyk.com/a/9723fe102e83/vsykhannja-sosnovykh-nasadzhen-prychynu-ta-naslidky>. Дата звернення: 21.12.2019.

6. С. Стриж. “На Вінниччині і по всій країні масово всихають ліси. Рятувати їх заважає законодавча бюрократія і некомпетентні «любителі-захисники» лісу,” *Вежа*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://vezha.vn.ua/vsyhannya-legen-krayiny-chomu-masovo-gynut-ukrayinski-lisy-ta-yak-yih-vryatuvaty-grafika/>. Дата звернення: 21.12.2019.

7. “Міжнародна конференція щодо всихання соснових лісів: законодавчі обмеження в Україні блокують боротьбу з "біологічною пожежею,” *Державне агентство лісових ресурсів України*. [Електронний

ресурс]. Доступно: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art\\_id=202061&cat\\_id=32888](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=202061&cat_id=32888). Дата звернення: 20.12.2019.

8. “Загибель лісових насаджень за причинами (2010-2018),” *Державне агентство лісових ресурсів України*. [Електронний ресурс]. Доступно:

[http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/sg/lis/zld/zld\\_u/zag\\_lis\\_za\\_pruch\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/sg/lis/zld/zld_u/zag_lis_za_pruch_u.htm). Дата звернення: 20.09.2019.

9. О. Косовець, та О. Доніч, “Кліматичні особливості 2015,” *Праці Центральної геофізичної обсерваторії*, №12 (26), с. 4-9, 2016.

10. О. Косовець, та О. Доніч, “Кліматичні особливості 2015,” *Праці Центральної геофізичної обсерваторії*, №13 (27), с. 4-10, 2017.

11. О. Косовець, та О. Доніч, “Кліматичні особливості 2017,” *Праці Центральної геофізичної обсерваторії*, №14 (28), с. 10-16, 2018.

12. О. Косовець, та О. Доніч, “Кліматичні особливості 2018,” *Праці Центральної геофізичної обсерваторії*, №15 (29), с. 4-10, 2019.

13. “Всихання соснових лісів набуло катастрофічних масштабів,” *Гаряча агрополітика*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://agropolit.com/news/12523-vsihannya-sosnovih-lisiv-nabuli-katastrofichnih-masshtabiv--minagropolitiki>. Дата звернення: 27.09.2019.

14. В. Краснов. *Фітоекологія з основами лісівництва: навчальний посібник*. Херсон, Україна: ОЛДІ-ПЛЮС, 2014.

15. “Всихання хвойних лісів - проблема набула загрозливих масштабів,” *Інформаційно-аналітичні матеріали до науково-практичної конференції з питань напрацювання заходів попередження поширення шкідників і хвороб лісу*, Київ, 2018

16. “Захист лісу від шкідників та хвороб,” *Державне агентство лісових ресурсів України*. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art\\_id=118935&cat\\_id=118934](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=118935&cat_id=118934). Дата звернення: 22.09.2019.

17. К. Давиденко, та В. Чудак, “Як захистити українські ліси від шкідників та хвороб,” *Державне агентство лісових ресурсів України*. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art\\_id=122254&cat\\_id=32888](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=122254&cat_id=32888). Дата звернення: 22.09.2019.

18. “Захист лісу від шкідників і хвороб,” *Київське обласне та по м. Києву управління лісового та мисливського господарства*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://kyivlis.gov.ua/ohorona-ta-zahyst-lisu/zahyst-lisu-vid-shkidnykiv-i-hvorob>. Дата звернення: 20.12.2019.

19. В. Скляр, та Ю. Злобін, *Екологічна фізіологія рослин. Підручник*. Суми. Університетська книга, 2015.

20. “Охорона лісу від пожеж,” *Державне агентство лісових ресурсів України*. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article;jsessionid=FABD108B33A9D9C3002499DA84D88D25.app1?art\\_id=118927&cat\\_id=118926](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article;jsessionid=FABD108B33A9D9C3002499DA84D88D25.app1?art_id=118927&cat_id=118926). Дата звернення: 23.09.2019.

21. “Пожежі в лісах та причини їх виникнення,” *Вінницька обласна державна адміністрація*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://vin.gov.ua/news/ostanni-novyny/4641-pozhezhi-v-lisakh-ta-prychyna-ikh-vunyknennia>. Дата звернення: 21.12.2019.

22. Я. Вишняков, *Безопасность жизнедеятельности. Теория и практика: учебник для бакалавров*. Москва, Россия: Издательство Юрайт, 2015.

23. “Лісова пожежа,” *Вікіпедія*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://uk.wikipedia.org/wiki/лісова\\_пожежа](https://uk.wikipedia.org/wiki/лісова_пожежа). Дата звернення: 20.12.2019.

24. “Какие деревья считаются аварийными и как от них избавиться,” *lesoruby.com*. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://lesoruby.com/articles/avarijnyje-derevuva-11-03-2016>. Дата обращения: 20.12.2019.

25. “Как оценить аварийность и опасность деревьев или две вещи, о которых нужно помнить владельцам деревьев,” *Нобили*. [Электронный

ресурс]. Доступно: <https://www.nobili.ru/articles/138-risk-accident-trees.html>. Дата звернення: 20.12.2019.

26. Кабінету Міністрів України. (2016, жовтня 26) Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 27 липня 1995 р. № 555 і від 12 травня 2007 р. № 724. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/756-2016-%D0%BF/paran11#n11>. Дата звернення: 23.09.2019.

27. Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. (2006, квітня 10). *Наказ №105 ,Про затвердження Правил утримання зелених насаджень у населених пунктах України* [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0880-06>. Дата звернення: 17.03.2020.

28. “30 Years of Research and Development,” *Arbor.tools*. [Online] <https://www.arbor.tools/rinntech-resistograph-hk/>. Accessed on: 21.12.2019.

29. “На российский рынок поступила новая, усовершенствованная модель РЕЗИСТОГРАФА©,” *RESISTOGRAPH®*. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://resistograph.ru/resistograf.htm>. Дата звернення: 21.12.2019.

30. “Прайс-лист РЕЗИСТОГРАФА©,” *RESISTOGRAPH*. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.resistograph.ru/price.htm>. Дата обращения: 22.12.2019.

31. С. Пальчиков, “Заглянуть внутрь дерева поможет резистограф,” *ЛесПромИнформ. Техника и технологи*. №6 (28), с. 70-71, 2005 г.

32. Анциферов А. “Гнили деревьев. Что с ними делать”, *Живой® лес интернет-журнал*, [Электронный ресурс]. Доступно: <https://givoyles.ru/articles/drevesina/kachestvo-drevesiny/>. Дата обращения: 22.12.2019.

33. “Диагностика внутреннего состояния дерева на наличие скрытых гнилей,” *Arborist.ru*. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://arborist.ru/services/lechenie-derevev/diagnostika-derevev/>. Дата обращения: 26.09.2019.

34. “1200P HD Wifi 8LED Borescope Inspection Camera IP68 For Android,” Banggood. [Online]. [https://www.banggood.com/1200P-HD-Wifi-8LED-Borescope-Inspection-Camera-IP68-For-Android-iPhone-p-1469901.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/1200P-HD-Wifi-8LED-Borescope-Inspection-Camera-IP68-For-Android-iPhone-p-1469901.html?cur_warehouse=CN). Accessed on: 22.12.2019.

35. А. Шмуратко. “Обзор современных устройств, предназначенных для исследования состояния древесины,” *Конференция «Благоустройство городов Северо-Запада»*. Санкт-Петербург, 2010 г.

36. “Обследование деревьев,” [Электронный ресурс]. Доступно: <https://zles.ru/uslugi/uhod-za-derevyami/obsledovanie-derevev/>. Дата звернення: 22.12.2019.

37. Е. Рунова, та И. Гарус, А. Мухачева. “Оценка качества деревьев сосны обыкновенной (*pinus sylvestris* L.),” на *XIX Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы лесного комплекса-2019"*. – Брянск: БГИТУ, 2019. с. 144-148. ISSN 2310-9335

38. А. Топтун, та Ю. Бондаренко. “Огляд методів пошуку дефектів в зелених насадженнях,” на *I Всеукраїн. наук.-практ. конф. «Наука України – погляд молодих вчених крізь призму сучасності», 20-22 квітня 2017 року»*. Черкаси, 2017, с. 55-57.

39. А. Топтун, та Ю. Бондаренко. “Огляд та вибір оптимального п’єзоперетворювача для неруйнівного контролю дефектів в дереві,” на *VI Міжнародної науково-практичної конференції «Датчики, прилади та системи», присвяченої пам’яті професора В.М. Шаранова - 2017*. Черкаси-Херсон-Лазурне, 2017, с. 73-74.

40. А. Топтун, та Ю. Бондаренко. “Забезпечення контакту п’єзодатчика з корою дерева,” *XVII Міжнародна науково-технічна конференція ПРИЛАДОБУВАННЯ: стан і перспективи 15-16 травня 2018 р.* Київ, 2018, с.159.

41. А. Топтун, и Ю. Бондаренко. “Выбор контактных жидкостей для проведения ультразвукового исследования зеленых насаждений,” *VI Міжнародної науково-практичної конференції «Датчики, прилади та*

системи», присвяченої пам'яті професора В.М. Шаранова – 2018. Черкаси-Херсон-Лазурне, 2018, с. 89-91.

42. О. Тюкавина, “О методах интерпретации результатов акустической томографии древесины сосны”, *Лесной журнал*. № 4, с. 61-67, 2015.

43. И. Мельничук, Й. Йассин Солиман, и О. Черданцева. “Диагностика внутреннего состояния деревьев *tilia cordata mill.* с использованием комплекса аппаратуры акустической ультразвуковой томографии «АРБОТОМ®»,” *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия Агрономия и животноводство*. № 5. с. 99-101, 2015.

44. “Метод измерения потока сока путем отношения,” *ICT International Pty Ltd.* [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/HRM30\\_ru.pdf](http://www.ictinternational.com/content/uploads/2014/03/HRM30_ru.pdf). Дата обращения: 27.09.2019.

45. Stephen S. O. et al. “An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants,” *Tree Physiology*, no 21, pp. 589–598, 2001.

46. О. Кизим, та І. Петухова, “Іонометричний аналіз”, *Фармацевтична енциклопедія*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/5820/ionometricnij-analiz>. Дата звернення: 27.09.2019.

47. “Влияние кислотности почвы на растения. Способы нейтрализации высокой кислотности почвы”, *Agrostory* [Электронный ресурс]. Доступно: <https://agrostory.com/info-centre/knowledge-lab/vliyanie-kislotnosti-pochvy-na-rasteniya-sposoby-neytralizatsii-vysokoy-kislotnosti-pochvy/>. Дата обращения: 27.09.2019.

48. С. Роговський, “Сучасні проблеми створення та утримання зелених насаджень у населених пунктах України”, *Науковий вісник НЛТУ України*, № 29(1), 9-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290101>

49. І. Букша, Т. Пивовар, В. Пастернак, М. Букша, В. Солодовник, та В. Яроцький, “Визначення критеріїв та індикаторів сталого ведення лісового господарства на основі даних інвентаризації і моніторингу лісів”, *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Лісівництво та декоративне садівництво*. № 198(1), с. 14-23. 2014.

50. І. Букша, Т. Пивовар, та М. Букша, “Динаміка стану дубових деревостанів за результатами моніторингу лісів у Луганській, Сумській та Харківській областях”, *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Лісівництво та декоративне садівництво*. № 171(3), с. 114-122, 2012.

51. І. Букша, М. Бондарук, О. Целіщев, Т. Пивовар, М. Букша, та В. Пастернак, “Прогноз життєздатності сосни звичайної і дуба звичайного у разі зміни клімату в рівнинній частині України” *Лісівництво і агролісомеліорація*. № 130, с. 146-158, 2017.

52. І. Букша, М. Букша, та Т. Пивовар, “Оцінка репрезентативності даних моніторингу лісів України за різної щільності мережі ділянок спостережень”, *Лісівництво і агролісомеліорація*. № 134, с. 66-77, 2019.

53. І. Букша, та М. Букша, “Применение мобильной ГИС-технологии field-map в лесном и садово-парковом хозяйстве”, *Науковий вісник НЛТУ України*, № 23 (5), с. 28-34, 2013.

54. О. Козка, “Лісовий моніторинг в Україні та ЄС,” *Газета “Природа і суспільство”*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ekoinform.com.ua/?p=4991>. Дата звернення: 23.12.2019.

55. “Моніторинг лісів”, *ДП “Берегометське лісомисливське господарство”* [Електронний ресурс]. Доступно: [http://blmg.com.ua/60-0\\_](http://blmg.com.ua/60-0_). Дата звернення: 23.12.2019.

56. В. Зацерковний, Н. Оберемок, та К. Ягорлицька, “Застосування технологій ГІС і ДЗЗ в задачах моніторингу лісових ценозів”, *Наукоємні*



технології. №4. с. 21-31, 2017. DOI: 10.18372/2310-5461.29.10093. Дата звернення: 23.12.2019.

57. Е. Позняк, “Правове регулювання моніторингу лісів в Україні з урахуванням міжнародних та європейських тенденцій”, *Часопис Київського університету права*, № 4, с. 247-251, 2015,

58. Слободяник М. П. “Використання методів ДЗЗ та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів” *Фотограмметрія і дистанційне зондування*. №1. с. 21-31, 2014.

59. “Геоінформаційна система для лісового господарства”, *MagneticOne Municipal Technologies*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://magneticonemt.com/geoinformatsijna-systema-dlya-lisovogo-gospodarstva>. Дата звернення: 23.12.2019.

60. І. Творошенко. *Конспект лекцій з дисципліни «Геоінформаційні системи в задачах моніторингу» для студентів I курсу денної форми навчання*. Харків, Україна: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. .

61. О. Нікулін, О.Багров, “Сучасні методи визначення вогнищ лісових”, *Журнал «Надзвичайна ситуація»*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ns-plus.com.ua/2017/03/03/suchasni-metody-vyznachennya-vognyssh-lisovyh-pozhezh/>. Дата звернення: 23.12.2019.

62. В. Зацерковний, І. Тішаєв, та О. Шищенко, “Застосування матеріалів дистанційного зондування в завданнях моніторингу лісових пожеж і кількісного оцінювання рослинності”, *Наукоємні технології*. №1. с. 21-31, 2016. DOI: 10.18372/2310-5461.29.10093.

63. “NASA. Fire Information for Resource Management System”, *Fire Information for Resource Management System*. [Online]. Доступно: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#z:2;c:59.1,15.4;d:2019-09-27..2019-09-28>. Accessed on: 28.09.2019.

64. “Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ),” *Національний центр управління та випробувань космічних засобів*. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://spacecenter.gov.ua/dzz>. (дата звернення: 28.09.2019).

65. В. Триснюк, та Т. Триснюк “Інформаційні технології та просторово-часові методи регіональної системи моніторингу,” *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. № 2, с. 120-128, 2014.

66. В. Омельчук, та М. Фомін, “Методика оцінки стану лісів України за даними дистанційного зондування Землі із космосу”, *Вісник Житомирський національний агроекологічний університет*. № 1, с. 348–358, 2009.

67. В. Миронюк, С. Кохан, та А. Востоков, “Особливості визначення видового складу міських зелених насаджень за даними супутникових знімків GeoEye-1,” *Біоресурси і природокористування*. т. 4, № 5-6, с. 176-182, 2012.

68. В. Миронюк, “Сучасні методи оцінки таксаційних показників лісових насаджень на основі дешифрування космічних знімків”, *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Лісівництво та декоративне садівництво*. № 187(1), с. 209-215, 2013.

69. В. Миронюк, та А. Білоус, “Узгодженість оцінок площі лісів за даними глобальної карти змін лісового покриву і мультиспектральних супутникових знімків”, *Науковий вісник НЛТУ України*. № 27(5), с. 38-42, 2017.

70. І. Романчук, “Використання матеріалів дистанційного зондування для моніторингу земельних ресурсів (лісове господарство),” *Часопис картографії*. № 5, с. 71-76, 2012.

71. В. Поліщук, М. Шемякін, В. Шпак, І. Козаченко “Досвід застосування ІТ-технологій в лісовій таксації на прикладі ДП Золотоніське лісове господарство,” *Вісник Уманського національного університету садівництва*. № 1, с. 104-110, 2018.

72. Р. Волкова, “Зберігання та аналіз інформації про лісову рослинність, отриманої при моніторингу лісів”, *Лісівництво і агролісомеліорація: Зб. наук. пр.* №114, с. 130-134, 2008.

73. “Площі сухостоїв в областях Карпатського регіону”, *Газета Кабінету Міністрів України «Урядовий кур’єр»* [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ukurier.gov.ua/uk/articles/ploshi-suhostoyiv-v-oblastyah-karpatskogo-/>. Дата звернення: 21.11.2019.

74. І. Букша, “Вплив зміни клімату на лісове господарство України та шляхи пом’якшення негативних наслідків,” *Доповідь засідання громадської ради при Державному агентстві лісових ресурсів в м. Київ, 21 червня 2018 р.*, [Електронний ресурс]. Доступно: [https://tlu.kiev.ua/uploads/media/СС\\_Impact\\_on\\_forests\\_forestry\\_Buksha20180621.pdf](https://tlu.kiev.ua/uploads/media/СС_Impact_on_forests_forestry_Buksha20180621.pdf). Дата звернення: 21.11.2019.

75. Т. Касіч, “Найбільше занепокоєння викликає стан соснових насаджень, де ситуація стала катастрофічною”, *Доповідь IV з’їзді лісівників України, 2019* [Електронний ресурс]. Доступно: <http://ua-ekonomist.com/17782-tetyana-kasch-naublshe-zanepokoeyennya-viklikaye-stan-sosnovih-nasadzhen-de-situacya-stala-katastrofchnoyu.html>. Дата звернення: 23.12.2019.

76. О. Бородіна, С. Киризюк, В. Яровий, Ю. Єрмольєв, та Т. Єрмольєва, “Моделювання локальних систем землекористування в умовах глобальних змін клімату”, *Економіка і прогнозування*. № 1. с. 117-128, 2016.

77. Ю. Буц. Математичне моделювання постпірогенної релаксії геосистем, *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Екологія*. № 1070, вип. 9. с. 31-34, 2013.

78. В. Свинчук, С. Зібцев, та В. Гуменюк, “Особливості таксаційної будови штучних соснових деревостанів заповідних лісів центрального Полісся України”, *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Лісівництво та декоративне садівництво*. № 198(2), с. 53-58. 2014.

79. В. Миронюк, “Особливості впливу умов урбанізованого середовища на біометричні параметри дерев міських зелених насаджень”, *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Лісівництво та декоративне садівництво*. № 187 (3). - с. 159-166, 2013.

80. І. Базюк. Агарикоїдні гриби лісів Українського Розточчя: Автореф. дис. канд. с.-г. наук., Укр. держ. лісотехн. ун-т. Львів, 2003.

81. І. Іванюк, та В. Кусік, “Шкодочинність комах у насадженнях дуба звичайного в зоні Західнополіського та Центральнополіського лісових округів України”, *Лісове і садово-паркове господарство*. №14, 2018.

82. П. Яворовський, “Вплив змін клімату на лісові екосистеми”, *Лісове і садово-паркове господарство*. №6, с. 1-8, 2015.

83. П. Яворовський, “Ліс та потепління клімату”, *Лісове і садово-паркове господарство*. №13, 2017.

84. М. Костриба, В. Крамарець, Г. Гриник, В. Буній, та П. Новоринський, “Всихання ялинових лісостанів на Буковині”, *Лісівництво і агролісомеліорація: Зб. наук. пр.* № 114. с. 152-158, 2008.

85. В. Ткаченко, “Екотопічні трансформації степових екосистем під впливом кліматичних змін у другій половині ХХ та на початку ХХІ століть” *Доповіді Національної академії наук України*. № 11. с. 94-102. 2017.

86. І. Порохняч, “Пошкодження крон сосни лубоїдами у стінах лісу, що межують зі зрубом великого згарища”, *Лісівництво і агролісомеліорація: Зб. наук. пр.* № 116. с. 45-48, 2009.

87. Г. Криницький, “Система лісівничих заходів щодо ліквідації наслідків масового всихання ялиників у буково-ялицевих типах лісу Карпат”, *Лісівництво і агролісомеліорація: Зб. наук. пр.* № 115. с. 152-158, 2009.

88. А.П. Олійник, та Мороз, “Математичне моделювання процесів забруднення ґрунтів як результату технологічних процесів”, *Восточно-Европейский журнал передових технологий*. № 1, с. 4-9, 2015.

89. І. Л. Лотиш, “Математичні та програмні аспекти моделювання розвитку двовидового лісу”, *Науковий вісник НЛТУ України*. № 24/3. с. 358-365, 2014.

90. С. Шевчук, “Оцінка та прогнозування підтоплення території на основі нейронних мереж у задачах моніторингу”, *Меліорація і водне господарство*. № 99, с. 147-159. 2011.

91. О. Борисенко. Прогнозування поширення пожеж та осередків шкідливих комах у соснових лісах засобами ГІС: автореферат. к-та техн. наук. *Національна академія наук України український ордена «знак пошани» науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького*, 2018.

92. О. Токар. Інформаційна технологія дослідження стоку вуглецю в лісових екосистемах: Автореф. дис. к-та техн. наук. *Національний університет «Львівська політехніка»*, 2015.

93. “Ліси черкащини – загальна характеристика”, *Черкаське обласне управління лісового та мисливського господарства*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://lis-ck.gov.ua/?page\\_id=93](https://lis-ck.gov.ua/?page_id=93). Дата звернення: 26.12.2019.

94. “На Черкащині всихають тисячі гектарів”, *Нова доба*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://novadoba.com.ua/42436-na-cherkaschyni-vsykhayut-tysyachi-gektariv-sosny.html>. Дата звернення: 26.12.2019.

95. “Водневий показник (рН-фактор)”, *Flora Growing*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://floragrowing.com/uk/encyclopedia/vodnevyu-rokaznyk-ph-faktor\\_](https://floragrowing.com/uk/encyclopedia/vodnevyu-rokaznyk-ph-faktor_) Дата звернення: 26.12.2019.

96. “рН-метр”, *Вікіпедія*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ru.wikipedia.org/wiki/РН-метр>. Дата звернення: 26.12.2019.

97. “В’язкість”, *Вікіпедія*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uk.wikipedia.org/wiki/В%27язкість>. Дата звернення: 04.01.2020.
98. “Методи определения вязкости жидкости”, *StudFiles*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://studfile.net/preview/6884463/page:5/> Дата обращения: 04.01.2020.
99. “Инструкция к анализатору почвы ЕТР-303”, *Umax.pro*. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://www.umax.pro/?page\\_id=730](https://www.umax.pro/?page_id=730). Дата обращения: 20.03.2020.
100. “Кондуктометр карманный HI 98301 DiST 1 (TDS)”, *Лабораторные измерительные приборы. Hanna Instruments* [Електронний ресурс]. Доступно: <http://hannainst.info/product/hi98301>. Дата обращения: 20.03.2020.
101. Ярошко М. “Кислотність ґрунтів та її вплив на живлення рослин” *Агроном*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.agronom.com.ua/kyslotnist-gruntiv-ta-yiyi-vplyv-na-zhyv/>. Дата звернення: 20.03.2020.
102. В. Даниленко. “Кислотность почвы: что это? Как влияет? Определяем и регулируем”, *Агроном*. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.agronom.co.ua/kislotnost-pochvy-hto-eto-kak-vliyaet-opredelyaem-i-reguliruem/#gallery-4>. Дата обращения: 20.03.2020.
103. Скляр В. Г. *Екологічна фізіологія рослин : підручник*. Суми, Україна: Університетська книга, 2018.
104. Правильное использование тест-полосок [Електронний ресурс]. Доступно: <https://toptest-poloska.com.ua/a271905-pravilnoe-ispolzovanie-test.html>. Дата обращения: 20.03.2020.
105. Є. Володарський, та Л. Кошева, *Статистична обробка даних*. Київ, Україна: НАУ, 2008.
106. В. А. Ващенко, М. О. Бондаренко та ін. “*Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями*”. Черкаси, 2004

107. С. П. Лапач, С. Г. Радченко, и П. П. Бабич, “Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ)”. *Каталог программных продуктов Украины*, с. 24-27, 1993.

108. С. Радченко, и С. Лапач, "Методология создания новой техники и технологий", *Київ: Технологические системы*, №1, с. 41–44, 2003.

109. С. Г. Радченко, “Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем,” *Київ: ІВЦ “Політехніка”*, 88 с, 2001.

110. М. Бондаренко, Ю. Бондаренко, и А. Бабаев, “Применение метода атомно-силовой микроскопии в прогнозировании срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов”, в *VII Международном семинаре Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, 2006.

111. С. А. Билоконь, О. В. Свиридова, В. С. Антонюк, М. А. Бондаренко и др., "Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии", *Наноинженерия*, №1 (19), с. 10-13, 2013

112. Nocedal et. al., *Numerical Optimization, Springer Series in Operations Research*. Verlag, Germany: Springer, 1999.

113. А. Пантелеев, и Т. Летова, *Методы оптимизации в примерах и задачах*. Москва, Россия: Высшая школа, 2005.

114. **А. Топтун**, та Ю. Бондаренко, “Зонування деревних насаджень за показаннями датчиків для дистанційного вимірювання якісних характеристик ґрунту”, *Вісник Київського політехнічного інституту. Сер. Приладобудування*. – 2020. – Вип. 59 (1). – С. 57-62.

115. **А. Топтун**, та Ю. Бондаренко, “Розробка комплексного методу визначення санітарного стану деревних насаджень Бондаренко”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. №2, с. 5-13, 2020.

116. E. Entchev, “Modern information systems for automated management of auxiliary processes”, *International scientific journal "Innovations"*, no 1, pp. 25-27, 2019.

117. Крутько, Н. Р. Прокопчук, А. И. Глоба “Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 02 04 «Технология пластических масс»”, Минск: БГТУ, 2014. ISBN 978-985-530-354-2.

118. Что такое 3D печать и 3D принтер”, *Make 3d*. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://make-3d.ru/articles/chto-takoe-3d-pechat/>. Дата обращения: 24.03.2020.

119. А. Попова, “Химический способ нанесения золотых покрытий на изделия радиоэлектронной техники”, *Радиопромышленность*. № 2. с. 75-78. 2016.

120. М.О. Дацько, “Как приготовить садовый вар в домашних условиях”, *Огородник*. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.ogorodnik.com/articles/kak-prigotovit-sadovyy-var-v-domashnih-usloviyah>. Дата обращения: 25.03.2020.

121. **А. Топтун**, and Yu. Bondarenko, “Information-measuring system for monitoring the sanitary condition of tree stands”, *International scientific journal "Industry 4.0"*. No 3. pp. 142-147, 2020.

122. V. Tychkov, R. Trembovetskaya, T. Kisil, and Y. Bondarenko, “Using Ion-selective Electrodes in Environmental Monitoring”, in 10th International Conference “Environmental Engineering” Gediminas Technical University, Vilnius, 2017 proceedings. eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-476-044-0.

123. V. Sharapov, Zh. Sotula, L. Kunickaya. *Piezoelectric Electroacoustic Transducers*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer Verlag, 2014.



ДОДАТКИ

## Додаток А

## Категорії санітарного стану хвойних та листяних деревних насаджень

Категорія	Ознаки стану ХВОЙНИХ дерев	Ознаки стану ЛИСТЯНИХ дерев
1	2	3
І – без ознак ослаблення	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Крона густа,</li> <li>- Хвоя/листя насиченого зеленого кольору, річний приріст нормальний для даної породи, умов зростання, віку і сезону,</li> <li>- Кореневі лапи та стовбури дерев не мають зовнішніх ознак пошкодження</li> </ul>	
ІІ – ослаблені	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Крона середньої густоти,</li> <li>• Хвоя зеленого кольору,</li> <li>• Річний приріст зменшений не більше ніж на <math>\frac{1}{2}</math> від норми</li> <li>• Присутнє невелике до <math>\frac{1}{3}</math> механічне пошкодження стовбурів або кореневих лап,</li> <li>• Наявність на <math>\frac{1}{4}</math> всього периметру стовбуру ран та напливів</li> <li>• Наявність ознак об'їдання хвої до 30% у молодих, середньовікових і пристиглих деревних насадженнях, та у стиглих і перестійних деревних насадженнях до 20%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Крона середньої густоти,</li> <li>• Листя зеленого кольору</li> <li>• Річний приріст зменшений не більше ніж на <math>\frac{1}{2}</math> від норми.</li> <li>• Присутнє невелике (до <math>\frac{1}{4}</math>) механічне пошкодження стовбурів або кореневих лап,</li> <li>• Наявність поодиноких водяних пагонів,</li> <li>• Наявність на <math>\frac{1}{4}</math> всього периметру ракових утворень та напливів,</li> <li>• Наявність нахилу насаджень до 10 градусів від вертикальної осі,</li> <li>• Ураження до 75% листів борошнистою россою,</li> <li>• Наявність ознак об'їдання листя до 25%.</li> </ul>

1	2	3
<p>III – дуже ослаблені</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ажурна форма крони,</li> <li>• Хвоя зеленого кольору,</li> <li>• Зменшена довжина більше ніж у <math>\frac{1}{2}</math> рази від норми,</li> <li>• Річний приріст зменшений більше ніж у 2 рази від норми,</li> <li>• В середній частині крони деревних насаджень наявні поодинокі сухі скелетні гілки,</li> <li>• Наявність великої кількості кущів омели, а також механічне пошкодження стовбурів або кореневих лап від <math>\frac{1}{3}</math> до <math>\frac{2}{3}</math> периметра,</li> <li>• До <math>\frac{2}{3}</math> периметра наявні ракові утворення,</li> <li>• Наявність нахилу насаджень до 30 градусів від вертикальної осі,</li> <li>• Не більше ніж на <math>\frac{2}{3}</math> периметра наявний злам вершини живої частини крони.</li> <li>• Опік окоренка до ступеню відмирання кадмію не менше <math>\frac{3}{4}</math> периметра,</li> <li>• Більше ніж на 30-50% рани та напливи периметру всього стовбура,</li> <li>• Наявність ознак об'їдання хвої шкідниками до 31-90% у молодих, середньовікових і пристиглих дерев, та у стиглих і перестійних деревних рослин до 21-70%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ажурна форма крони,</li> <li>• Дрібне світло-зелене листя</li> <li>• Річний приріст відсутній або не значний,</li> <li>• В різних частинах крони деревних насаджень наявні поодинокі сухі скелетні гілки,</li> <li>• Наявність на <math>\frac{1}{2}</math> всього периметру ракових утворень, механічних пошкоджень кореневих лап або стовбура,</li> <li>• Наявність нахилу насаджень до 20-30 градусів від вертикальної осі,</li> <li>• Не більше ніж <math>\frac{2}{3}</math> наявний злам вершини живої частини крони.</li> <li>• Наявність великої кількості кущів омели та водяних пагонів.</li> <li>• Ураження до 76-100% листів борошнистою россою,</li> <li>• Наявний процес соковиділення на стовбурі та гілках,</li> <li>• Наявність ознак об'їдання хвої шкідниками до 90% у молодих, середньовікових і пристиглих дерев, та у стиглих і перестійних деревних рослин до 70%.</li> </ul>

1	2	3
IV – відмираючі	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Крона має дуже ажурну форму</li> <li>• Хвої притаманний світло-зелений колір,</li> <li>• Річний приріст повністю відсутній,</li> <li>• Наявність по всій висоті крони всихання більше половини скелетних гілок,</li> <li>• Присутнє суттєве механічне пошкодження стовбурів або кореневих лап більше ніж <math>\frac{2}{3}</math> периметра,</li> <li>• Більше ніж на <math>\frac{2}{3}</math> периметра наявні ракові утворення,</li> <li>• Опік кореневої шийки з наявним процесом відмирання кадмію або нагар на стовбурі висотою до нижньої частини крони більше ніж <math>\frac{1}{2}</math> периметра,</li> <li>• Більше ніж <math>\frac{1}{2}</math> наявний злам вершини живої частини крони, або 100% обламування живих гілок,</li> <li>• Деревні насадження заселені стовбуровими шкідниками з локальним відшаруванням кори або з наявними плодовими тілами дереворуйнівних грибів, дуплами на стовбурах,</li> <li>• Рівень дефоліації понад 90 % - у молодих і середньовікових, понад 70% - у стиглих і перестійних деревних насадженнях</li> <li>• Більше ніж 30% крони заселено омелою,</li> <li>• Деревя, в яких наявна підірвана коренева система,</li> <li>• Наявність нахилу нижньої та середньої частин дерева більше 30 градусів від вертикальної осі,</li> <li>• Деревя з дугоподібними зігнутими стовбурами.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Крона має дуже ажурну форму</li> <li>• Щорічний приріст повністю відсутній</li> <li>• Листя має досить дрібні розміри,</li> <li>• Понад <math>\frac{2}{3}</math> частини крони всохло або всихає,</li> <li>• Механічні пошкодження стовбурів або кореневих лап,</li> <li>• Більше ніж на <math>\frac{2}{3}</math> периметру дерева присутні ракові утворення, у випадку поперечного раку дубу при 100% охопленні периметра,</li> <li>• Наявність нахилу стовбуру насаджень більше 30 градусів від вертикальної осі,</li> <li>• Більше ніж на <math>\frac{2}{3}</math> периметра наявний злам вершини крони,</li> <li>• Наявні сліди ураження стовбуровими шкідниками,</li> <li>• Наявні масові чи відмираючі водяні пагони,</li> <li>• Наявність дупел на стовбурах або плодові тіла дерево-руйнівних грибів,</li> <li>• Більше ніж 50% крони заселено омелою,</li> <li>• Деревя, в яких наявна підірвана коренева система,</li> <li>• Наявність нахилу нижньої та середньої частин дерева більше 30 градусів від вертикальної осі,</li> <li>• Деревя з дугоподібними зігнутими стовбурами.</li> </ul>

1	2	3
V – свіжий сухостій	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Хвоя рудого кольору,</li> <li>• Часткове опадання кори деревних насаджень</li> <li>• Древа в повністю уражені стовбуровими шкідниками, або ж вже відпрацьовані,</li> <li>• Наявність зламаного стовбуру в дереві.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Наявність засохлого листя, або воно повністю відсутнє,</li> <li>• Древа в повністю уражені стовбуровими шкідниками, або ж вже відпрацьовані,</li> <li>• Наявність зламаного стовбуру в дереві.</li> </ul>
VI – старий сухостій	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Хвоя, листя та гілки другого та третього порядку відсутні,</li> <li>• Спостерігається процес опадання кори,</li> <li>• Під корою наявні дереворуйнівні гриби.</li> </ul>	

## Додаток Б

### Математичні регресійні моделі, які описують залежності показників деревного соку від зовнішніх кліматичних факторів (MathCAD)

Вхідні дані:  $i := 0..5$      $j := 0..5$

$$c := \begin{pmatrix} 5.5 \\ 6 \\ 6.03 \\ 4.87 \\ 5.83 \\ 6.83 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} 13.4 \\ 3.97 \\ 22.7 \\ 17.2 \\ 26.43 \\ 32.83 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} x1(i) := c_i & x21 := 505 \\ x3(i) := b_i & x22 := 823 \\ pH(i) := pH2_i \end{matrix} \quad pH2 := \begin{pmatrix} 6.37 \\ 6.33 \\ 7.33 \\ 7.13 \\ 8.6 \\ 6.67 \end{pmatrix}$$

Розраховані коефіцієнти регресії:  $b0 := 7.39$      $b1 := .43$      $b2 := 0.00367$      $b3 := -0.16$   
 $b11 := -.1$      $b22 := -0.00001$      $b12 := 0.0006$      $b23 := 0.00028$      $b33 := 0.0038$      $b13 := -0.015$

Рівняння регресії:

$$Y1(x1, x3) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x21 + b3 \cdot x3 + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x21^2 + b33 \cdot x3^2 + b12 \cdot x1 \cdot x21 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x21 \cdot x3$$

$$Y2(x1, x3) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x22 + b3 \cdot x3 + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x22^2 + b33 \cdot x3^2 + b12 \cdot x1 \cdot x22 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x22 \cdot x3$$

Контроль значень:     $pH_k := 7.5$      $Sol_k := 194$      $T_k := 33.6$

$$Y_k(pH_k, Sol_k, T_k) := b0 + b1 \cdot pH_k + b2 \cdot Sol_k + b3 \cdot T_k + b11 \cdot pH_k^2 + b22 \cdot Sol_k^2 + b33 \cdot T_k^2 + b12 \cdot pH_k \cdot Sol_k + b13 \cdot pH_k \cdot T_k + b23 \cdot Sol_k \cdot T_k$$

$$Y_k(pH_k, Sol_k, T_k) = 3.158$$

$$b0 = 7.39 \quad b11 \cdot (c_3)^2 = -2.372 \quad b12 \cdot c_3 \cdot x21 = 1.476$$

$$b1 \cdot c_3 = 2.094 \quad b22 \cdot (x21)^2 = -2.55 \quad b13 \cdot c_3 \cdot b_3 = -1.256$$

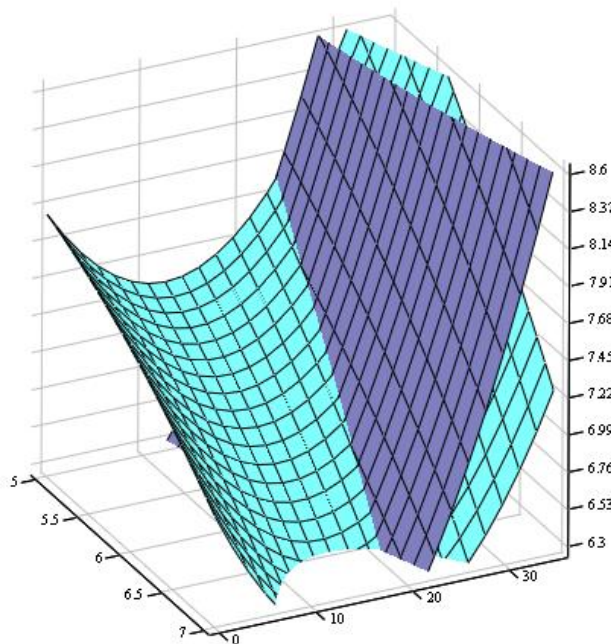
$$b2 \cdot x21 = 1.853 \quad b33 \cdot (b_3)^2 = 1.124 \quad b23 \cdot x21 \cdot b_3 = 2.432$$

$$b3 \cdot b_3 = -2.752$$

$$DD(x1, x3) := \frac{Y1(x1, x3) + Y2(x1, x3)}{2}$$

$$D(x1, x3, pH) := \left| \frac{Y1(x1, x3) + Y2(x1, x3)}{2} \right| - pH$$

$Y1(5.5, 13.4) = 7.027$	$Y2(5.5, 13.4) = 6.214$	$DD(5.5, 13.4) = 6.62$	$pH(i) =$ 6.37 6.33 7.33 7.13 8.6 6.67	$D(5.5, 13.4, 6.37) = 0.25$
$Y1(6, 3.97) = 7.12$	$Y2(6, 3.97) = 5.562$	$DD(6, 3.97) = 6.341$		$D(6, 3.97, 6.33) = 0.011$
$Y1(6.03, 22.7) = 6.96$	$Y2(6.03, 22.7) = 7.075$	$DD(6.03, 22.7) = 7.018$		$D(6.03, 22.7, 7.33) = -0.312$
$Y1(4.87, 17.2) = 7.439$	$Y2(4.87, 17.2) = 6.844$	$DD(4.87, 17.2) = 7.141$		$D(4.87, 17.2, 7.13) = 0.011$
$Y1(5.83, 26.43) = 7.419$	$Y2(5.83, 26.43) = 7.829$	$DD(5.83, 26.43) = 7.624$		$D(5.83, 26.43, 8.6) = -0.976$
$Y1(6.83, 32.83) = 7.156$	$Y2(6.83, 32.83) = 8.327$	$DD(6.83, 32.83) = 7.741$		$D(6.83, 32.83, 6.67) = 1.071$



Вхідні дані:  $i := 0..5$      $j := 0..5$

$$c := \begin{pmatrix} 5.5 \\ 6 \\ 6.03 \\ 4.87 \\ 5.83 \\ 6.83 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} 13.4 \\ 3.97 \\ 22.7 \\ 17.2 \\ 26.43 \\ 32.83 \end{pmatrix} \quad C1 := \begin{pmatrix} 3.0 \\ 2.8 \\ 2.6 \\ 2.1 \\ 1.1 \\ .6 \end{pmatrix}$$

$x1(i) := c_i$      $x21 := 505$   
 $x3(i) := b_i$      $x22 := 823$   
 $C(i) := C1_i$

Розраховані коефіцієнти регресії:

$$\begin{matrix} b0 := 8 & b1 := -4.5 & b2 := -0.005 & b3 := -1.6 \\ b11 := -0.0011 & b22 := -0.000009 & b12 := .00111 & b23 := .00027 & b33 := -0.008 & b13 := 0.03 \end{matrix}$$

Рівняння регресії:

$$Y1(x1, x3) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x21 + b3 \cdot x3 + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x21^2 + b33 \cdot x3^2 + b12 \cdot x1 \cdot x21 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x21 \cdot x3$$

$$Y2(x1, x3) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x22 + b3 \cdot x3 + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x22^2 + b33 \cdot x3^2 + b12 \cdot x1 \cdot x22 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x22 \cdot x3$$

Контроль значень:     $pH_k := 4.5$      $Sol_k := 80$      $T_k := 3.6$

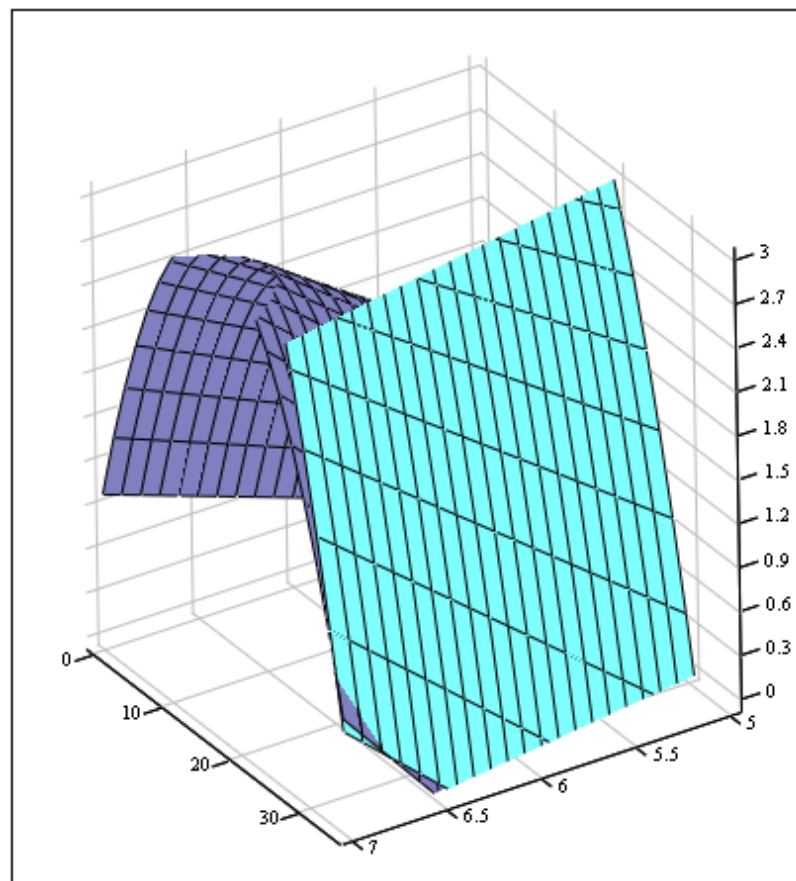
$$Y_k(pH_k, Sol_k, T_k) := b0 + b1 \cdot pH_k + b2 \cdot Sol_k + b3 \cdot T_k + b11 \cdot pH_k^2 + b22 \cdot Sol_k^2 + b33 \cdot T_k^2 + b12 \cdot pH_k \cdot Sol_k + b13 \cdot pH_k \cdot T_k + b23 \cdot Sol_k \cdot T_k$$

$$Y_k(pH_k, Sol_k, T_k) = 5.779$$

$$\begin{matrix} b0 = 8 & b11 \cdot (c_3)^2 = -0.026 & b12 \cdot c_3 \cdot x21 = 2.73 \\ b1 \cdot c_3 = -2.192 & b22 \cdot (x21)^2 = -2.295 & b13 \cdot c_3 \cdot b_3 = 2.513 \\ b2 \cdot x21 = -2.525 & b33 \cdot (b_3)^2 = -2.367 & b23 \cdot x21 \cdot b_3 = 2.345 \\ b3 \cdot b_3 = -2.752 & & \end{matrix}$$

$$DD(x1, x3) := \frac{(Y1(x1, x3) + Y2(x1, x3))}{2} \quad D(x1, x3, C) := \left| \frac{(Y1(x1, x3) + Y2(x1, x3))}{2} - C \right|$$

$Y1(5.5, 13.4) = 4.212$	$Y2(5.5, 13.4) = 1.913$	$DD(5.5, 13.4) = 3.063$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td><math>C(i) =</math></td></tr> <tr><td>3</td></tr> <tr><td>2.8</td></tr> <tr><td>2.6</td></tr> <tr><td>2.1</td></tr> <tr><td>1.1</td></tr> <tr><td>0.6</td></tr> </table>	$C(i) =$	3	2.8	2.6	2.1	1.1	0.6	$D(5.5, 13.4, 3) = 0.063$
$C(i) =$											
3											
2.8											
2.6											
2.1											
1.1											
0.6											
$Y1(6, 3.97) = 4.298$	$Y2(6, 3.97) = 1.366$	$DD(6, 3.97) = 2.832$	$D(6, 3.97, 2.8) = 0.032$								
$Y1(6.03, 22.7) = 3.254$	$Y2(6.03, 22.7) = 1.94$	$DD(6.03, 22.7) = 2.597$	$D(6.03, 22.7, 2.6) = -2.973 \times 10^{-3}$								
$Y1(4.87, 17.2) = 3.431$	$Y2(4.87, 17.2) = 1.237$	$DD(4.87, 17.2) = 2.334$	$D(4.87, 17.2, 2.1) = 0.234$								
$Y1(5.83, 26.43) = 2.196$	$Y2(5.83, 26.43) = 1.132$	$DD(5.83, 26.43) = 1.664$	$D(5.83, 26.43, 1.1) = 0.564$								
$Y1(6.83, 32.83) = 1.211$	$Y2(6.83, 32.83) = 1.05$	$DD(6.83, 32.83) = 1.131$	$D(6.83, 32.83, .6) = 0.531$								



Y1, Y2

Вхідні дані:  $i := 0..5$      $j := 0..5$

$$c := \begin{pmatrix} 5.5 \\ 6 \\ 6.03 \\ 4.87 \\ 5.83 \\ 6.83 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} 13.4 \\ 3.97 \\ 22.7 \\ 17.2 \\ 26.43 \\ 32.83 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} x1(i) := c_i & x21 := 505 \\ x3(i) := b_i & x22 := 823 \\ V(i) := V1_i & \end{matrix} \quad V1 := \begin{pmatrix} 235 \\ 210 \\ 285 \\ 250 \\ 315 \\ 370 \end{pmatrix}$$

Розраховані коефіцієнти регресії:

$$\begin{matrix} b0 := 200 & b1 := -96 & b2 := 0.009 & b3 := -279 \\ b11 := -0.1952 & b22 := 0.000019 & b12 := 0.00173 & b23 := -0.00052 & b33 := .16195 & b13 := .0576 \end{matrix}$$

Рівняння регресії:

$$Y1(x1, x3) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x21 + b3 \cdot x3 + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x21^2 + b33 \cdot x3^2 + b12 \cdot x1 \cdot x21 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x21 \cdot x3$$

$$Y2(x1, x3) := b0 + b1 \cdot x1 + b2 \cdot x22 + b3 \cdot x3 + b11 \cdot x1^2 + b22 \cdot x22^2 + b33 \cdot x3^2 + b12 \cdot x1 \cdot x22 + b13 \cdot x1 \cdot x3 + b23 \cdot x22 \cdot x3$$

Контроль значень:     $pH_k := 7.5$      $Sol_k := 194$      $T_k := 33.6$

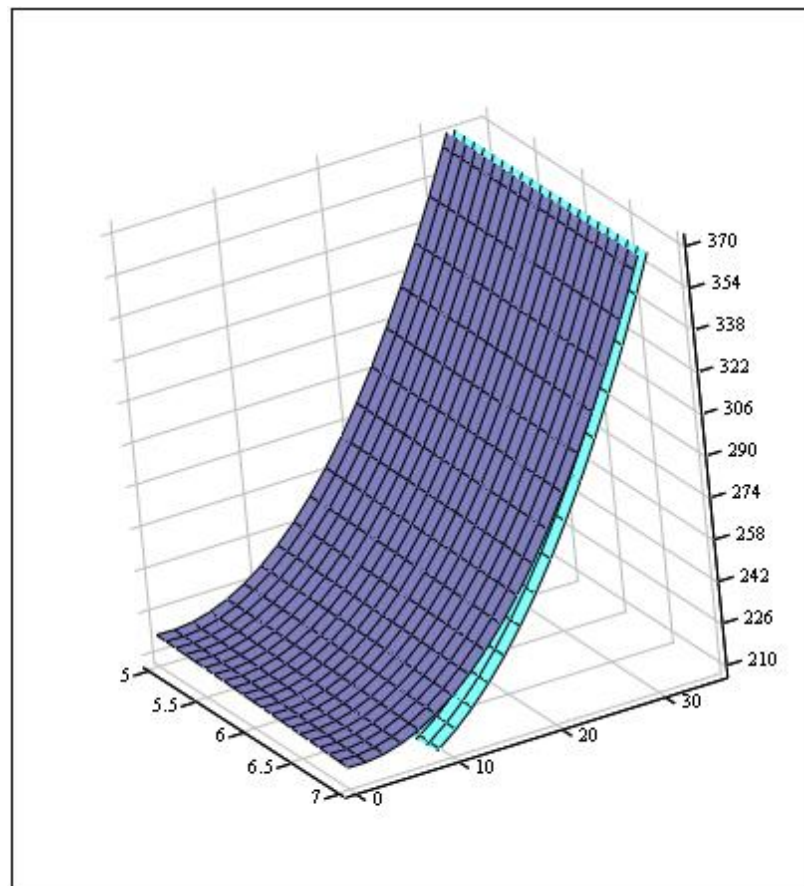
$$Y_k(pH_k, Sol_k, T_k) := b0 + b1 \cdot pH_k + b2 \cdot Sol_k + b3 \cdot T_k + b11 \cdot pH_k^2 + b22 \cdot Sol_k^2 + b33 \cdot T_k^2 + b12 \cdot pH_k \cdot Sol_k + b13 \cdot pH_k \cdot T_k + b23 \cdot Sol_k \cdot T_k$$

$$Y_k(pH_k, Sol_k, T_k) = 371.385$$

$$\begin{matrix} b0 = 200 & b11 \cdot (c_3)^2 = -4.63 & b12 \cdot c_3 \cdot x21 = 4.255 \\ b1 \cdot c_3 = -4.675 & b22 \cdot (x21)^2 = 4.845 & b13 \cdot c_3 \cdot b_3 = 4.825 \\ b2 \cdot x21 = 4.545 & b33 \cdot (b_3)^2 = 47.911 & b23 \cdot x21 \cdot b_3 = -4.517 \\ b3 \cdot b_3 = -4.799 & & \end{matrix}$$

$$DD(x1, x3) := \frac{(Y1(x1, x3) + Y2(x1, x3))}{2} \quad D(x1, x3, V) := \left| \frac{(Y1(x1, x3) + Y2(x1, x3))}{2} - V \right|$$

$Y1(5.5, 13.4) = 229.078$	$Y2(5.5, 13.4) = 240.774$	$DD(5.5, 13.4) = 234.926$	$V(i) =$	$D(5.5, 13.4, 235) = -0.074$						
$Y1(6, 3.97) = 203.62$	$Y2(6, 3.97) = 217.15$	$DD(6, 3.97) = 210.385$	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><tr><td>235</td></tr><tr><td>210</td></tr><tr><td>285</td></tr><tr><td>250</td></tr><tr><td>315</td></tr><tr><td>370</td></tr></table>	235	210	285	250	315	370	$D(6, 3.97, 210) = 0.385$
235										
210										
285										
250										
315										
370										
$Y1(6.03, 22.7) = 280.813$	$Y2(6.03, 22.7) = 291.263$	$DD(6.03, 22.7) = 286.038$		$D(6.03, 22.7, 285) = 1.038$						
$Y1(4.87, 17.2) = 247.761$	$Y2(4.87, 17.2) = 258.482$	$DD(4.87, 17.2) = 253.121$		$D(4.87, 17.2, 250) = 3.121$						
$Y1(5.83, 26.43) = 309.943$	$Y2(5.83, 26.43) = 319.665$	$DD(5.83, 26.43) = 314.804$		$D(5.83, 26.43, 315) = -0.196$						
$Y1(6.83, 32.83) = 369.381$	$Y2(6.83, 32.83) = 378.595$	$DD(6.83, 32.83) = 373.988$		$D(6.83, 32.83, 370) = 3.988$						



Y1, Y2



### Додаток В.

Динамічна модель, що використовує механізм нечіткого виведення за  
Мамдані та центроїдний метод дефазифікації

[System]	Name='Tem'
Name='Fuzzylogic Ann'	Range=[-8 35]
Type='mamdani'	NumMFs=3
Version=2.0	MF1='min': 'gaussmf', [-5 -8]
NumInputs=3	MF2='norm': 'gaussmf', [5 15]
NumOutputs=3	MF3='max': 'gaussmf', [5 35]
NumRules=0	[Output1]
AndMethod='min'	Name='ph'
OrMethod='max'	Range=[6 8]
ImpMethod='min'	NumMFs=3
AggMethod='max'	MF1='acid': 'trimf', [6 6 6.7]
DefuzzMethod='centroid'	MF2='norm': 'trimf', [6.5 7 7.5]
[Input1]	MF3='lug': 'trimf', [7.2 8 8.8]
Name='pH_grond'	[Output2]
Range=[3 9]	Name='Sugar'
NumMFs=3	Range=[0 1]
MF1='acid': 'trimf', [3 3 6]	NumMFs=3
MF2='norm': 'trimf', [5.5 6.5 7.5]	MF1='min': 'trimf', [-0.4 0 0.4]
MF3='lug': 'trimf', [7 9 9]	MF2='norm': 'trimf', [0.1 0.5 0.9]
[Input2]	MF3='max': 'trimf', [0.6 1 1.4]
Name='Sol'	[Output3]
Range=[0 1]	Name='Visk'
NumMFs=3	Range=[0 1]
MF1='min': 'trimf', [-0.4 0 0.4]	NumMFs=3
MF2='norm': 'trimf', [0.1 0.5 0.9]	MF1='min': 'trimf', [-0.4 0 0.4]
MF3='max': 'trimf', [0.6 1 1.4]	MF2='norm': 'trimf', [0.1 0.5 0.9]
[Input3]	MF3='max': 'trimf', [0.6 1 1.4] [Rules]

### Додаток Г.

Програма для прогнозування строку життєвого циклу  
дерева від зміни якісних показників деревного соку (MathLAB)

```
% Значення вимірюваної температури(Градусах Цельсія) і точність її
вимірювання в відн.од.
% на добу вперед в погодинному дозволі
% матриця DATAS має три стовпці<Date> - <Hour> - <Value>

load DATAS;      % Загрузка вхідних даних із файла DATAS.mat
TimeSeries = DATAS;

% Постановка задачі прогнозування
T = datenum('01.09.2018 23:00:00', 'dd.mm.yyyy hh:MM:ss'); % Момент
прогнозу (Origin)
P = 24;          % Горизонт прогнозування (Forecast
horizon)

% Параметри моделі по вибірці максимальної подібності
M = 6;
Step = 4;

%Визначення вибірки нової історії
Index = find(TimeSeries(:,1) == datenum(year(T), month(T), day(T)) &
TimeSeries(:,2) == hour(T));
if length(Index) > 1
    fprintf(['Помилка часового ряду: відмітка часу T знайдена в часовому ряді
більше 1 разу \n']);
elseif isempty(Index)
```

```

fprintf(['Помилка часового ряду: відмітка часу T знайдена в часовому ряді
не знайдена \n']);
else
    HistNewData = TimeSeries([Index-M+1:Index],:);    %Вибірка нової історії
(HistNewData)
    Index = Index - Step * 2;
end

%Визначити значення подібності
k = 1;
while Index > 2 * M
    HistOldData = TimeSeries([Index-M+1 : Index],:);
    Likeness(k,1)= Index;
    CheckOld = find(HistOldData(:,3) > 0);           % Перевірка на те, чи
нульові вектори
    CheckNew = find(HistNewData(:,3) > 0);
    if isempty(CheckOld) || isempty(CheckNew)
        Likeness(k,2) = 0;
    else
        Likeness(k,2) = abs(corr(HistOldData(:,3), HistNewData(:,3), 'type',
'Pearson'));
    end
    k = k + 1;
    Index = Index - Step;    %Повернення по часу назад на крок Step
end

%Визначення максимуму подібності
MaxLikeness = max(abs(Likeness(:,2)));
IndexLikeness = find(Likeness(:,2) == MaxLikeness);
MSP = Likeness(IndexLikeness(1),1);

```

```
fprintf(['Максимальна подібність MaxLikeness = ', num2str(MaxLikeness), '\n'])
```

```
%Визначення вибірки максимальної подібності
```

```
MSPData = TimeSeries([MSP-M+1 : MSP],:);      %Вибірка максимальної  
подібності (MSPData)
```

```
%Визначення базової вибірки
```

```
HistBaseData = TimeSeries([MSP+1:MSP+P],:);  %Базова вибірка  
(HistBaseData)
```

```
%Пошук коефіцієнтів alpha1 та alpha0
```

```
%Робимо апроксимацію HistNewData за допомогою MSPData за методом  
найменших квадратів
```

```
% В даному випадку рішення знаходиться через обернену матрицю
```

```
X = MSPData(:,3);
```

```
X(:,length(X(1,:))+1) = 1;    % Додаємо стовпчик з одиничним вектором 1
```

```
Y = HistNewData(:,3);
```

```
E = X(:,2);
```

```
Xn = X' * X;
```

```
Yn = X' * Y;
```

```
invX = inv(Xn);
```

```
A = invX * Yn;                % Шукані коефіцієнти alpha1 і alpha0 є значеннями  
матриці A
```

```
fprintf(['Коефіцієнт alpha1 = ', num2str(A(1,1)), ', коефіцієнт alpha0 =  
, num2str(A(2,1)), '\n'])
```

```
% Прогнозування
```

```
X = HistBaseData(:,3);
```

```

X(:,length(X(1,:))+1) = 1;
Forecast = X * A;          % Вибірка Прогноз, що містить 24 прогнозних
значення

% Оцінка помилки прогнозування

% 1) Визначаємо фактичні значення
Index = find(TimeSeries(:,1) == datenum(year(T), month(T), day(T)) &
TimeSeries(:,2) == hour(T));
Fact = TimeSeries([Index : Index+P-1],3);

% 2) Оцінка помилки MAE
MAE = mean(abs(Forecast - Fact));

% 3) Оцінка помилки MAPE
MAPE = mean(abs(Forecast - Fact)./Fact);

fprintf(['Момент прогнозу T = ',datestr(T,'dd.mm.yyyy HH:MM'),' \n',
'Горизонт прогнозу P = ', num2str(P),' \n', 'Помилка прогнозу MAE =
',num2str(MAE),' C/h, MAPE = ',num2str(MAPE*100),'%% \n']);

```

Результати чисельного розв'язання завдання (MathLAB)

Максимальна подібність MaxLikeness = 0.99868  
Коефіцієнт alpha1 = 1.8656, коефіцієнт alpha0 = -629.0423  
Момент прогнозу T = 01.05.2020 23:00  
Горизонт прогнозу P = 24  
Помилка прогнозу MAE = 49.588 C/h, MAPE = 5.0508%

## Додаток Д

### Розрахунок математичної моделі та зонування досліджуваної ділянки деревних насаджень за санітарним станом

1 етап: Апроксимація методом найменших квадратів по контрольним точкам досліджуваних ділянок

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad N := 3 \quad Lg\_max := 7 \quad Lv\_max := 9$$

Відстані від контр.точки 1 до контр. точки 2 та до контр.точки 3 (що лежать на одній горизонталі)

$$Rg_{1,2} := 5 \quad Rg_{1,3} := 7$$

Відстані від контр.точки 4 до контр. точки 5 та до контр.точки 6 (що лежать на одній горизонталі)

$$Rg_{2,2} := 4 \quad Rg_{2,3} := 6$$

Відстані від контр.точки 7 до контр. точки 8 та до контр.точки 9 (що лежать на одній горизонталі)

$$Rg_{3,2} := 3 \quad Rg_{3,3} := 6$$

Значення сан.стану в контр.точках  $SSg := \begin{pmatrix} 4 & 3 & 1 \\ 6 & 4 & 2 \\ 2 & 3 & 3 \end{pmatrix}$

Відстані від контр.точки 1 до контр. точки 4 та до контр.точки 7 (що лежать на одній вертикалі)

$$Rv_{1,2} := 5 \quad Rv_{1,3} := 9$$

Відстані від контр.точки 2 до контр. точки 5 та до контр.точки 8 (що лежать на одній вертикалі)

$$Rv_{2,2} := 3 \quad Rv_{2,3} := 7$$

Відстані від контр.точки 3 до контр. точки 6 та до контр.точки 9 (що лежать на одній вертикалі)

$$Rv_{3,2} := 4 \quad Rv_{3,3} := 7$$

Значення сан.стану в контр.точках  $SSv := SSg^T \quad SSv = \begin{pmatrix} 4 & 6 & 2 \\ 3 & 4 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$

Розрахунок вагових коефіцієнтів:  $w1 := \frac{SSg_{2,2}}{6} \quad w2 := \frac{SSg_{2,1} + SSg_{2,3}}{12} \quad w3 := \frac{SSg_{1,2} + SSg_{1,3}}{12} \quad w4 := \frac{SSg_{1,1} + SSg_{3,3}}{12} \quad w5 := \frac{SSg_{3,1} + SSg_{1,3}}{12} \quad ww := w1 + w2 + w3 + w4 + w5$

$$w1 := \frac{w1}{ww} \quad w1 = 0.267 \quad w2 := \frac{w2}{ww} \quad w2 = 0.267 \quad w3 := \frac{w3}{ww} \quad w3 = 0.133 \quad w4 := \frac{w4}{ww} \quad w4 = 0.233 \quad w5 := \frac{w5}{ww} \quad w5 = 0.1 \quad w1 + w2 + w3 + w4 + w5 = 1$$

$$X1 := \begin{pmatrix} 0 \\ Rg_{1,2} \\ Rg_{1,3} \end{pmatrix} \quad Y1 := \begin{pmatrix} SSg_{1,1} \\ SSg_{1,2} \\ SSg_{1,3} \end{pmatrix} \quad X2 := \begin{pmatrix} 0 \\ Rg_{2,2} \\ Rg_{2,3} \end{pmatrix} \quad Y2 := \begin{pmatrix} SSg_{2,1} \\ SSg_{2,2} \\ SSg_{2,3} \end{pmatrix} \quad X3 := \begin{pmatrix} 0 \\ Rg_{3,2} \\ Rg_{3,3} \end{pmatrix} \quad Y3 := \begin{pmatrix} SSg_{3,1} \\ SSg_{3,2} \\ SSg_{3,3} \end{pmatrix} \quad X4 := \begin{pmatrix} 0 \\ Rv_{1,2} \\ Rv_{1,3} \end{pmatrix} \quad Y4 := \begin{pmatrix} SSv_{1,1} \\ SSv_{1,2} \\ SSv_{1,3} \end{pmatrix} \quad X5 := \begin{pmatrix} 0 \\ Rv_{2,2} \\ Rv_{2,3} \end{pmatrix} \quad Y5 := \begin{pmatrix} SSv_{2,1} \\ SSv_{2,2} \\ SSv_{2,3} \end{pmatrix} \quad X6 := \begin{pmatrix} 0 \\ Rv_{3,2} \\ Rv_{3,3} \end{pmatrix} \quad Y6 := \begin{pmatrix} SSv_{3,1} \\ SSv_{3,2} \\ SSv_{3,3} \end{pmatrix}$$

$$A1 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N (X1_i)^4 & \sum_{i=1}^N (X1_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X1_i)^2 \\ \sum_{i=1}^N (X1_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X1_i)^2 & \sum_{i=1}^N X1_i \\ \sum_{i=1}^N (X1_i)^2 & \sum_{i=1}^N X1_i & N \end{bmatrix} \quad B1 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(X1_i)^2 \cdot Y1_i] \\ \sum_{i=1}^N (X1_i \cdot Y1_i) \\ \sum_{i=1}^N Y1_i \end{bmatrix}$$

$$A4 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N (X4_i)^4 & \sum_{i=1}^N (X4_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X4_i)^2 \\ \sum_{i=1}^N (X4_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X4_i)^2 & \sum_{i=1}^N X4_i \\ \sum_{i=1}^N (X4_i)^2 & \sum_{i=1}^N X4_i & N \end{bmatrix} \quad B4 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(X4_i)^2 \cdot Y4_i] \\ \sum_{i=1}^N (X4_i \cdot Y4_i) \\ \sum_{i=1}^N Y4_i \end{bmatrix}$$

$$A2 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N (X2_i)^4 & \sum_{i=1}^N (X2_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X2_i)^2 \\ \sum_{i=1}^N (X2_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X2_i)^2 & \sum_{i=1}^N X2_i \\ \sum_{i=1}^N (X2_i)^2 & \sum_{i=1}^N X2_i & N \end{bmatrix} \quad B2 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(X2_i)^2 \cdot Y2_i] \\ \sum_{i=1}^N (X2_i \cdot Y2_i) \\ \sum_{i=1}^N Y2_i \end{bmatrix}$$

$$A3 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N (X3_i)^4 & \sum_{i=1}^N (X3_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X3_i)^2 \\ \sum_{i=1}^N (X3_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X3_i)^2 & \sum_{i=1}^N X3_i \\ \sum_{i=1}^N (X3_i)^2 & \sum_{i=1}^N X3_i & N \end{bmatrix} \quad B3 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(X3_i)^2 \cdot Y3_i] \\ \sum_{i=1}^N (X3_i \cdot Y3_i) \\ \sum_{i=1}^N Y3_i \end{bmatrix}$$

$$C1 := \text{Isolve}(A1, B1) \quad a11 := C1_1 \quad a12 := C1_2 \quad a13 := C1_3$$

$$C2 := \text{Isolve}(A2, B2) \quad a21 := C2_1 \quad a22 := C2_2 \quad a23 := C2_3$$

$$C3 := \text{Isolve}(A3, B3) \quad a31 := C3_1 \quad a32 := C3_2 \quad a33 := C3_3$$

$$i := 1..N \quad j1 := 1..(\text{Lg\_max})$$

$$y1_{j1} := a11 \cdot (j1 - 1)^2 + a12 \cdot (j1 - 1) + a13 \quad yy1_1 := y1_1 \quad yy1_2 := y1_6 \quad yy1_3 := y1_{\text{Lg\_max}}$$

$$y2_{j1} := a21 \cdot (j1 - 1)^2 + a22 \cdot (j1 - 1) + a23 \quad yy2_1 := y2_1 \quad yy2_2 := y2_6 \quad yy2_3 := y2_{\text{Lg\_max}}$$

$$y3_{j1} := a31 \cdot (j1 - 1)^2 + a32 \cdot (j1 - 1) + a33 \quad yy3_1 := y3_1 \quad yy3_2 := y3_6 \quad yy3_3 := y3_{\text{Lg\_max}}$$

$$A5 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N (X5_i)^4 & \sum_{i=1}^N (X5_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X5_i)^2 \\ \sum_{i=1}^N (X5_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X5_i)^2 & \sum_{i=1}^N X5_i \\ \sum_{i=1}^N (X5_i)^2 & \sum_{i=1}^N X5_i & N \end{bmatrix} \quad B5 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(X5_i)^2 \cdot Y5_i] \\ \sum_{i=1}^N (X5_i \cdot Y5_i) \\ \sum_{i=1}^N Y5_i \end{bmatrix}$$

$$A6 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N (X6_i)^4 & \sum_{i=1}^N (X6_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X6_i)^2 \\ \sum_{i=1}^N (X6_i)^3 & \sum_{i=1}^N (X6_i)^2 & \sum_{i=1}^N X6_i \\ \sum_{i=1}^N (X6_i)^2 & \sum_{i=1}^N X6_i & N \end{bmatrix} \quad B6 := \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N [(X6_i)^2 \cdot Y6_i] \\ \sum_{i=1}^N (X6_i \cdot Y6_i) \\ \sum_{i=1}^N Y6_i \end{bmatrix}$$

$$C4 := \text{Isolve}(A4, B4) \quad a41 := C4_1 \quad a42 := C4_2 \quad a43 := C4_3$$

$$C5 := \text{Isolve}(A5, B5) \quad a51 := C5_1 \quad a52 := C5_2 \quad a53 := C5_3$$

$$C6 := \text{Isolve}(A6, B6) \quad a61 := C6_1 \quad a62 := C6_2 \quad a63 := C6_3$$

$$j2 := 1..(\text{Lv\_max})$$

$$y4_{j2} := a41 \cdot (j2 - 1)^2 + a42 \cdot (j2 - 1) + a43 \quad yy4_1 := y4_1 \quad yy4_2 := y4_6 \quad yy4_3 := y4_{\text{Lv\_max}}$$

$$y5_{j2} := a51 \cdot (j2 - 1)^2 + a52 \cdot (j2 - 1) + a53 \quad yy5_1 := y5_1 \quad yy5_2 := y5_6 \quad yy5_3 := y5_{\text{Lv\_max}}$$

$$y6_{j2} := a61 \cdot (j2 - 1)^2 + a62 \cdot (j2 - 1) + a63 \quad yy6_1 := y6_1 \quad yy6_2 := y6_6 \quad yy6_3 := y6_{\text{Lv\_max}}$$

$$\epsilon_{\text{www}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y1_i - yy1_i)^2}{3-1}} \quad \epsilon = 0.788$$

round(y1 <sub>j1</sub> )	round(y2 <sub>j1</sub> )	round(y3 <sub>j1</sub> )
4	6	2
4	6	2
4	5	3
4	5	3
4	4	3
3	3	3
2	2	3

$$\epsilon_{\text{www}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y2_i - yy2_i)^2}{3-1}} \quad \epsilon = 0.648$$

$$\epsilon_{\text{www}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y4_i - yy4_i)^2}{3-1}} \quad \epsilon = 1.037$$

round(y4 <sub>j2</sub> )	round(y5 <sub>j2</sub> )	round(y6 <sub>j2</sub> )
4	3	1
5	3	1
6	4	1
6	4	2
6	4	2
6	4	2
5	3	3
5	3	3
3	2	3

$$\epsilon_{\text{www}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y5_i - yy5_i)^2}{3-1}} \quad \epsilon = 0.486$$

$$\epsilon_{\text{www}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y3_i - yy3_i)^2}{3-1}} \quad \epsilon = 0.079$$

$$\epsilon_{\text{www}} := \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y6_i - yy6_i)^2}{3-1}} \quad \epsilon = 0.347$$

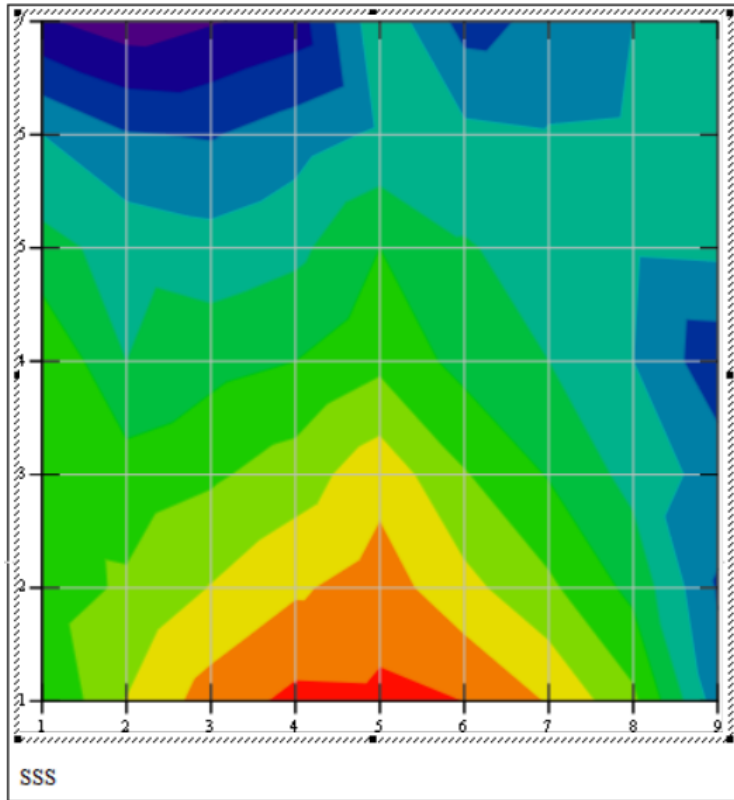
$SSS_{1,j1} := (y1_{j1})$      $SSS_{Lv\_max,j1} := (y3_{j1})$      $SSS_{j2,1} := (y4_{j2})$      $SSS_{j2,Lg\_max} := (y6_{j2})$      $SSS_{1,1} := \left(\frac{y1_1 + y4_1}{2}\right)$      $SSS_{1,Lg\_max} := \left(\frac{y1_{Lg\_max} + y6_1}{2}\right)$   
 $SSS_{Lv\_max,1} := \left(\frac{y3_1 + y4_{Lv\_max}}{2}\right)$      $SSS_{Lv\_max,Lg\_max} := \left(\frac{y3_{Lg\_max} + y6_{Lv\_max}}{2}\right)$      $Ax := \text{round}\left(\frac{Lg\_max}{2}\right)$      $Ay := \text{round}\left(\frac{Lv\_max}{2}\right)$      $SSS_{Ay,j1} := (y2_{j1})$      $SSS_{j2,Ax} := (y5_{j2})$   
 $SSS_{1,Ax} := \left(\frac{y2_1 + y5_1}{2}\right)$      $SSS_{Lv\_max,Ax} := \left(\frac{y2_{Lg\_max} + y5_{Lv\_max}}{2}\right)$      $SSS_{Ay,1} := \left(\frac{y2_1 + y4_{Ay}}{2}\right)$      $SSS_{Ay,Lg\_max} := \left(\frac{y2_{Ax} + y6_{Ay}}{2}\right)$      $SSS_{Ay,Ax} := \left(\frac{y2_{Ax} + y5_{Ay}}{2}\right)$   
 $inx1 := 2$      $outx1 := Ax - 1$      $inx2 := Ax + 1$      $outx2 := Lg\_max - 1$      $dx1 := outx1 - inx1 + 1$      $dx2 := outx2 - inx2 + 1$      $inx1 = 2$      $inx2 = 5$      $outx1 = 3$      $outx2 = 6$      $dx1 = 2$      $dx2 = 2$   
 $iny1 := 2$      $outy1 := Ay - 1$      $iny2 := Ay + 1$      $outy2 := Lv\_max - 1$      $dy1 := outy1 - iny1 + 1$      $dy2 := outy2 - iny2 + 1$      $iny1 = 2$      $iny2 = 6$      $outy1 = 4$      $outy2 = 8$      $dy1 = 3$      $dy2 = 3$



$$\begin{array}{l}
i := \text{inx1}.. \text{outx1} \quad j := \text{iny1}.. \text{outy1} \quad \text{SSS}_{j,i} := \frac{\text{SSS}_{j,i-1} + \frac{(\text{SSS}_{j,\text{outx1}+1} - \text{SSS}_{j,\text{inx1}-1})}{dx1 + 1} + \text{SSS}_{j-1,i} + \frac{(\text{SSS}_{\text{outy1}+1,i} - \text{SSS}_{\text{iny1}-1,i})}{dy1 + 1}}{2} \\
\text{SSS1}_{j,i} := w1 \text{SSS}_{j,i} + \frac{w2 \cdot (\text{SSS}_{j,i-1} + \text{SSS}_{j,i+1})}{2} + \frac{w3 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i} + \text{SSS}_{j+1,i})}{2} + \frac{w4 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i-1} + \text{SSS}_{j+1,i+1})}{2} + \frac{w5 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i+1} + \text{SSS}_{j+1,i-1})}{2} \quad \text{SSS}_{j,i} := \text{SSS1}_{j,i} \\
i := \text{inx2}.. \text{outx2} \quad j := \text{iny2}.. \text{outy2} \quad \text{SSS}_{j,i} := \frac{\text{SSS}_{j,i-1} + \frac{(\text{SSS}_{j,\text{outx2}+1} - \text{SSS}_{j,\text{inx2}-1})}{dx2 + 1} + \text{SSS}_{j-1,i} + \frac{(\text{SSS}_{\text{outy2}+1,i} - \text{SSS}_{\text{iny2}-1,i})}{dy2 + 1}}{2} \\
\text{SSS1}_{j,i} := w1 \text{SSS}_{j,i} + \frac{w2 \cdot (\text{SSS}_{j,i-1} + \text{SSS}_{j,i+1})}{2} + \frac{w3 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i} + \text{SSS}_{j+1,i})}{2} + \frac{w4 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i-1} + \text{SSS}_{j+1,i+1})}{2} + \frac{w5 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i+1} + \text{SSS}_{j+1,i-1})}{2} \quad \text{SSS}_{j,i} := \text{SSS1}_{j,i} \\
i := \text{inx2}.. \text{outx2} \quad j := \text{iny1}.. \text{outy1} \quad \text{SSS}_{j,i} := \frac{\text{SSS}_{j,i-1} + \frac{(\text{SSS}_{j,\text{outx2}+1} - \text{SSS}_{j,\text{inx2}-1})}{dx2 + 1} + \text{SSS}_{j-1,i} + \frac{(\text{SSS}_{\text{outy1}+1,i} - \text{SSS}_{\text{iny1}-1,i})}{dy1 + 1}}{2} \\
\text{SSS1}_{j,i} := w1 \text{SSS}_{j,i} + \frac{w2 \cdot (\text{SSS}_{j,i-1} + \text{SSS}_{j,i+1})}{2} + \frac{w3 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i} + \text{SSS}_{j+1,i})}{2} + \frac{w4 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i-1} + \text{SSS}_{j+1,i+1})}{2} + \frac{w5 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i+1} + \text{SSS}_{j+1,i-1})}{2} \quad \text{SSS}_{j,i} := \text{SSS1}_{j,i} \\
+ \\
i := \text{inx1}.. \text{outx1} \quad j := \text{iny2}.. \text{outy2} \quad \text{SSS}_{j,i} := \frac{\text{SSS}_{j,i-1} + \frac{(\text{SSS}_{j,\text{outx1}+1} - \text{SSS}_{j,\text{inx1}-1})}{dx1 + 1} + \text{SSS}_{j-1,i} + \frac{(\text{SSS}_{\text{outy2}+1,i} - \text{SSS}_{\text{iny2}-1,i})}{dy2 + 1}}{2} \\
\text{SSS1}_{j,i} := w1 \text{SSS}_{j,i} + \frac{w2 \cdot (\text{SSS}_{j,i-1} + \text{SSS}_{j,i+1})}{2} + \frac{w3 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i} + \text{SSS}_{j+1,i})}{2} + \frac{w4 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i-1} + \text{SSS}_{j+1,i+1})}{2} + \frac{w5 \cdot (\text{SSS}_{j-1,i+1} + \text{SSS}_{j+1,i-1})}{2} \quad \text{SSS}_{j,i} := \text{SSS1}_{j,i}
\end{array}$$

Підсумкові значення:

Карта зонуввання по сан.стану дерев



$$SSS = \begin{pmatrix} 4 & 4.257 & 4.286 & 4.5 & 3.657 & 3 & 1.557 \\ 5.022 & 4.572 & 4.229 & 3.5 & 3.321 & 2.532 & 1.214 \\ 5.733 & 5.025 & 4.423 & 3.833 & 3.18 & 2.461 & 1.452 \\ 6.133 & 5.428 & 4.743 & 4 & 3.374 & 2.757 & 1.714 \\ 6.111 & 5.75 & 5.333 & 4.375 & 4 & 3.083 & 3.375 \\ 6 & 5.158 & 4.541 & 3.833 & 3.545 & 3.114 & 2.31 \\ 5.467 & 4.603 & 3.965 & 3.5 & 3.286 & 3.034 & 2.643 \\ 4.622 & 3.856 & 3.326 & 3 & 3.067 & 3.063 & 3 \\ 2.733 & 2.444 & 2.778 & 2.167 & 3.111 & 3.111 & 3.19 \end{pmatrix}$$

$i := 1..Lg\_max$      $j := 1..Lv\_max$

$$SSS_{j,i} := \text{round}(SSS_{j,i}) \quad k := 1..6$$

$$r_k := \sum_{j=1}^{Lv\_max} \sum_{i=1}^{Lg\_max} (SSS_{j,i} = k)$$

Розподіл по категоріям:

$$Sum\_r := \sum r \quad Sum\_r = 63 \quad r := \frac{100r}{Sum\_r}$$

$$Sum\_r := \sum r \quad Sum\_r = 100$$

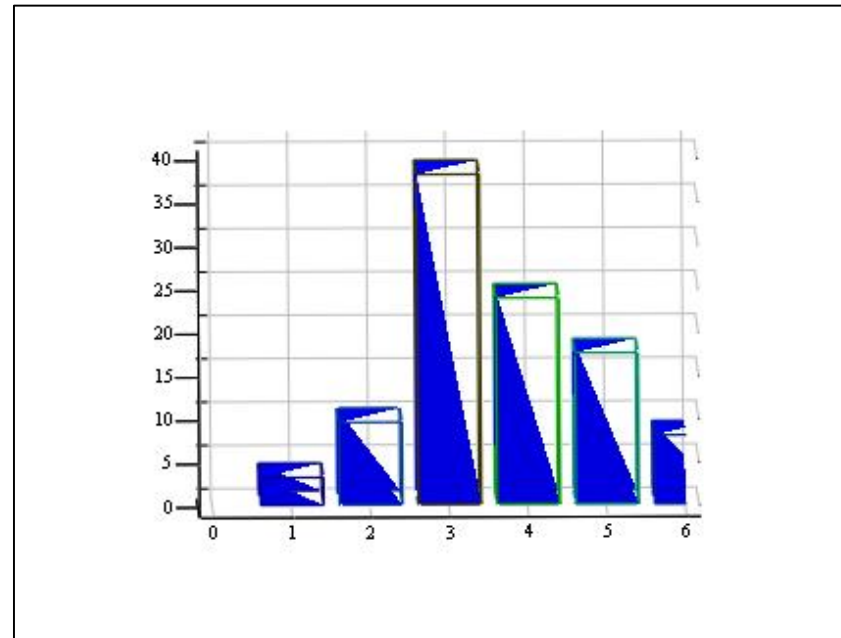
$$SSS = \begin{pmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 3 & 2 \\ 5 & 5 & 4 & 3 & 3 & 3 & 1 \\ 6 & 5 & 4 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 6 & 5 & 5 & 4 & 3 & 3 & 2 \\ 6 & 6 & 5 & 4 & 4 & 3 & 3 \\ 6 & 5 & 5 & 4 & 4 & 3 & 2 \\ 5 & 5 & 4 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 5 & 4 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 & 3 \end{pmatrix}$$

## Статистичні дані:

Процентна кількість дерев за категоріями:      Діаграма розподілу дерев по категоріях:

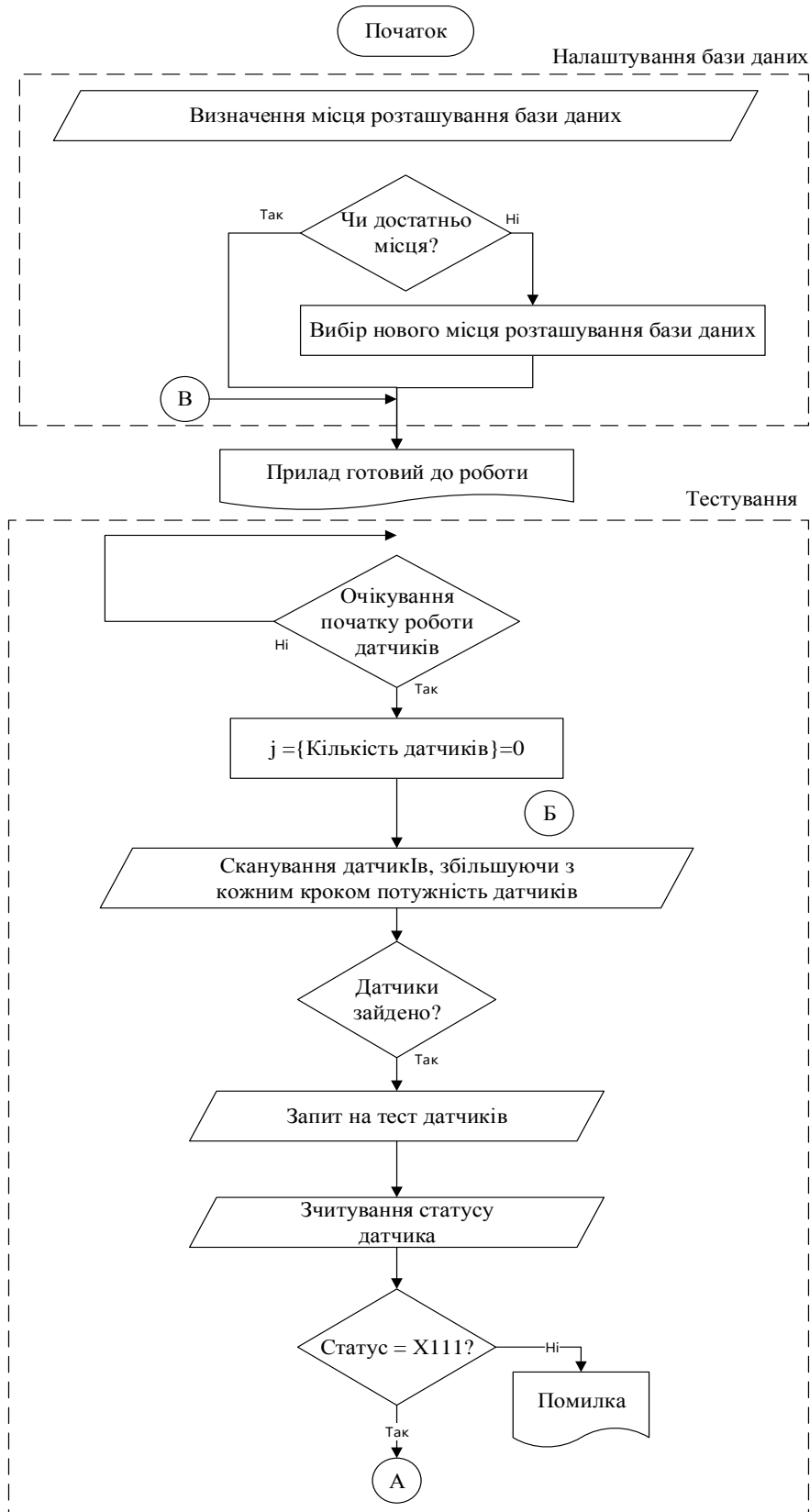
$r =$

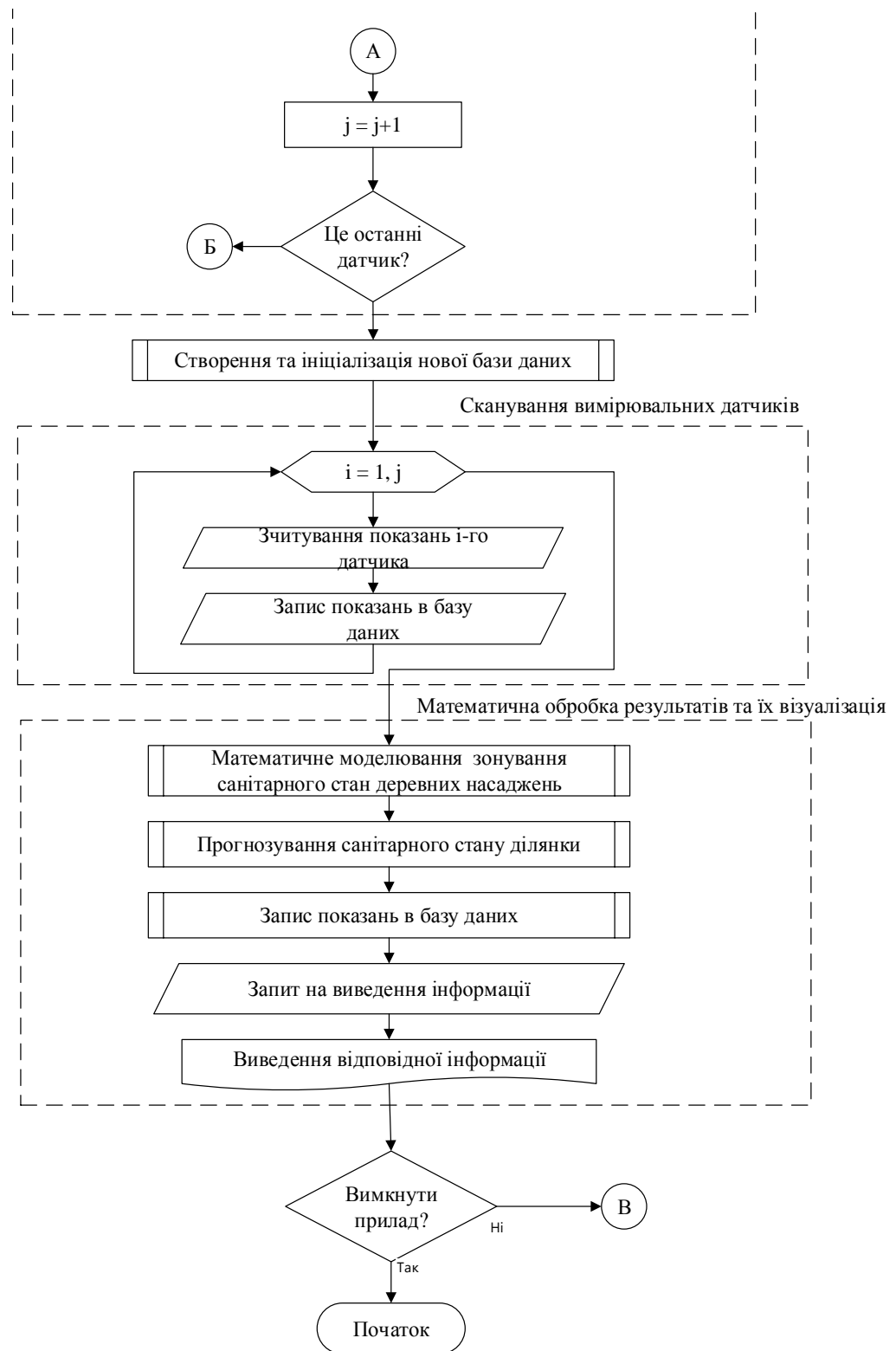
3.175
9.524
38.095
23.81
17.46
7.937



## Додаток Е

## Блок-схема програми управління ІВС дистанційного моніторингу СС ДН





## Додаток Є

### Визначення похибок моніторингу санітарного стану деревних насаджень

В процесі моніторингу санітарного стану деревних насаджень слід враховувати наступні похибки.

*Похибка геопозиціонування* ( $\delta_1$ ) – виникає в процесі віддаленого визначення положення вимірювального датчика відносно пристрою управління, рис.Є.1:

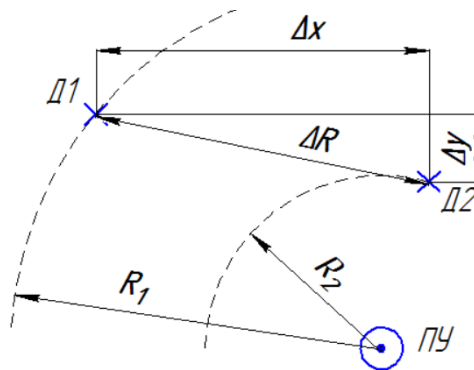


Рис. Є.1. Схема до визначення похибки позиціонування: ПУ – пристрій управління; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> – дерева, геолокація між якими обраховується; R<sub>1</sub> – відстань до Д<sub>1</sub> від ПУ; R<sub>2</sub> – відстань до Д<sub>2</sub> від ПУ

Похибка геопозиціонування дерев для моніторингу їх санітарного стану визначається за формулою (Є.1):

$$\Delta R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad \delta_1 = 1 - \frac{\Delta R}{R_1 - R_2} \quad (\text{Є.1})$$

де  $\Delta x, \Delta y$  – відповідно зміщення по осям координат  $x$  та  $y$  між Д<sub>1</sub> та Д<sub>2</sub>;  $\Delta R$  – відстань між деревами Д<sub>1</sub> та Д<sub>2</sub>.

Тому, наприклад, за умови:  $R_1 = 10$  м;  $R_2 = 7,5$  м;  $\Delta x = 2,2$  м;  $\Delta y = 1,1$  м, маємо:

$$\Delta R = \sqrt{4,84 + 1,21} = 2,46 \text{ м}, \quad R_1 - R_2 = 2,5 \text{ м.}$$

$$\delta_1 = 1 - \frac{2,46}{2,5} = 0,016 \text{ (1,6 \%)}.$$

*Похибка встановлення вимірювального датчика* ( $\delta_2$ ) – виникає при

відхиленні позиції встановлення вимірювального датчику від його правильного положення, рис.Є.2:

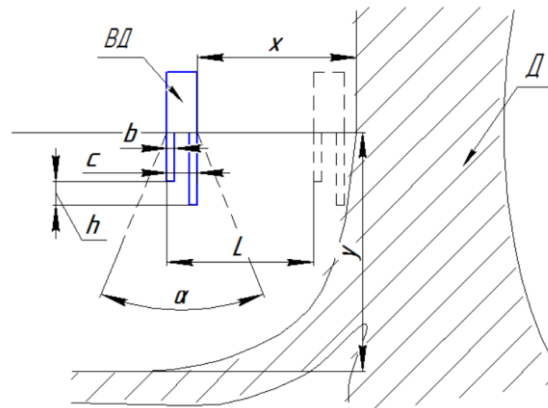


Рис. Є.2. Схема до визначення похибки встановлення вимірювального датчику:  
ВД – вимірювальний датчик; Д – досліджуване дерево;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – відповідно, фактична відстань між ВД та корою (корінням) дерева Д;  $\alpha$  – допустимий кут нахилу датчика відносно вертикального положення

Похибка встановлення вимірювального датчику визначається за формулою (Є.2):

$$\Delta x = \frac{L + b}{2} - c; \quad \Delta y = y - h; \quad \Delta \alpha = \arctg \frac{\Delta x}{\Delta y};$$

$$\delta_2 = \frac{x - \Delta x}{2} + \frac{y - \Delta y}{y} + \frac{\alpha - \Delta \alpha}{\alpha} \quad (\text{Є.2})$$

де  $L$  – відстань між фактичною та допустимою позиціями електродів ВД при його встановленні;  $b$  – товщина електродів ВД;  $c$  – відстань між електродами ВД;  $h$  – відстань між кінцями електродів ВД (різниця їх довжини).

Наприклад, в результаті експериментальних досліджень параметри встановлення датчика становили:  $b = 0,04$  м;  $c = 0,05$  м;  $L = 0,3$  м;  $x = 0,128$  м;  $h = 0,0005$  м;  $\alpha = 40^\circ$ ;  $y = 0,15$  м, тоді:

$$\Delta x = \frac{0,3 + 0,04}{2} - 0,05 = 0,12 \text{ м}; \quad \Delta y = 0,15 - 0,0005 = 0,1495 \text{ м};$$

$$\Delta\alpha = \arctg \frac{0,12}{0,1495} = 38,75^\circ$$

$$\delta_2 = \frac{0,128 - 0,12}{2} + \frac{0,15 - 0,1495}{0,1495} + \frac{40 - 38,75}{40} =$$

$$= 0,004 + 0,0033 + 0,0031 = 0,0104 (1,04\%).$$

Зауважимо, що похибки позиціонування та встановлення вимірювальних датчиків належать до суб'єктивних похибок.

*Інструментальна похибка* ( $\delta_3$ ) – безпосередньо, похибка точності виготовлення та дотримання форми і розмірів вимірювального датчика в процесі його експлуатації та модифікування.

Таким чином, під час експлуатації вимірювальний датчик може підлягати пошкодженню або руйнуванню своїх чутливих електродів, що призводить до некоректного визначення та інтерпретації отриманих результатів дослідження.

Визначення дефектів вимірювального інструменту та своєчасне його заміна є надійним методом усунення інструментальної похибки. Для забезпечення процесу необхідно проводити аналіз інструменту перед початком дослідження. Різниця в отриманих результатах вимірювання визначається, як невиключена систематична похибка вимірювального інструменту інформаційно-вимірювальної системи. При цьому відносна похибка визначається за формулою Є.3:

$$\delta_3 = \left| \frac{pH_e - pH}{pH_e} \right| + \left| \frac{Sol_e - Sol}{Sol_e} \right| + \left| \frac{T_e - T}{T_e} \right|, \quad (\text{Є.3})$$

де  $pH_e$ ,  $Sol_e$ ,  $T_e$  – відповідно, еталонні значення вимірюваних величин (показників кислотності, солоності ґрунту та температури повітря);  $pH$ ,  $Sol$ ,  $T$  – відповідно, фактичні значення вимірюваних величин, отриманих на досліджуваній ІВС.

Розраховане значення відносної інструментальної похибки знаходиться в межах 1%. Проте, слід враховувати, що різниці між фактичним (еталонним) та виміряними значеннями залежать від режимів та виду проведення досліджень, а



також їхньої кількості; при цьому збільшення цієї різниці від досліду до досліду відбувається не рівномірно.

Для виключення даної похибки при розрахунках вимірюваних параметрів, необхідно враховувати знайдені параметри, а також систематичну похибку еталонного засобу вимірювання ( $\Delta_{\text{ЕЗВ}}$ ) при визначенні параметрів поверхні в процесі їх вимірювання.

*Методичні похибки* ( $\delta_{\text{М}}$ ) – похибки, які виникають в процесі визначення та обрахунку розподілу ДН за категоріями санітарного стану, що перешкоджають отриманню та розрахунку їх коректних результатів. Величина методичної похибки залежить від впливу вологості та температури досліджуваної ділянки ґрунту

Для визначення методичної похибки скористаємося наступним підходом. Досліджувані параметри визначалися на розроблюваній ІВС для одних і тих самих робочих розчинів. Відношенням отриманого та середнього значення виміряних результатів визначали значення СКВ для методичної похибки:

$$S_{\text{М}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (pH_e - pH_i)^2 + \sum_{i=1}^n (Sol_e - Sol_i)^2 + \sum_{i=1}^n (T_e - T_i)^2}{n-1}}, \quad (\text{Є.4})$$

де  $pH_e$ ,  $Sol_e$ ,  $T_e$  – відповідно, еталонні значення вимірюваних величин (показників кислотності, солоності ґрунту та температури повітря);  $pH$ ,  $Sol$ ,  $T$  – відповідно, значення вимірюваних величин, отриманих на досліджуваній ІВС шляхом вимірювання одного і того ж зразка не менше 9 разів.

Розрахована методична похибка не перевищує 1%.

*Випадкові (стохастичні) похибки* ( $\delta_{\text{СТ}}$ ) – похибки, виникнення яких не залежить від точності та якості методично-інструментальної бази, а також кваліфікації оператора, і є набором ймовірнісних факторів, попереднє встановлення яких неможливе.

При проведенні експериментальних досліджень на отримані результати

впливають різноманітні стохастичні процеси. Зокрема до таких процесів належать:

- кліматичні процеси, які враховують вплив умов навколишнього середовища: вологості, температури та тиску
- механічні процеси, які враховують вплив акустичних шумів та вібрації
- енергетичні процеси, які враховують зовнішній електромагнітний та тепловий вплив

Неможливо передбачити ступінь впливу цих стохастичних процесів на точність отриманих результатів вимірювання.

При оцінці вимірюваної фізичної величини враховується не конкретне фіксоване значення, а виміряні значення цієї величини, які знаходяться в цій області. Так, при кожних подальших вимірюваннях через зміну характеру інтенсивності показників, отримується новий результат, який радикально відрізняється від попереднього.

Вплив таких чинників на результати контролю необхідно розглядати як стохастичні (випадкові) величини. Після проведення багаторазових вимірювань встановлюються закономірності, яким підпорядковуються такі випадкові величини.

Так, стохастична похибка визначається за середньоквадратичних відхиленням (СКВ), яке виникає від впливу енергетичних, кліматичних та фізико-механічних факторів (формула Є.4):

$$S_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_{\text{вин } i}^2}{(n-1)}}, \quad (\text{Є.4})$$

де  $\delta_{\text{вин } i}$  – значення відносної випадкової похибки при  $i$ -му вимірюванні;  $n$  – кількість проведених вимірювань випадкової похибки.

За результатами експериментально визначених значень відносної похибки моніторингу  $\delta_{\text{вин } i}$  для встановлених діапазонів параметрів негативних факторів

(кліматичних, механічних, електричних, тощо) при мінімальній кількості проведених вимірювань  $n = 9$ , максимальне значення СКВ становить:  $S_B = 0,37\%$ .

При проведенні розрахунків слід враховувати, що стохастичні похибки не можуть бути визначені завчасно, проте їхня мінімізація зводиться до дотримання оптимальних умов моніторингу та зовнішніх умов впливу на цей процес.

Остаточо маємо, що відносна похибка результатів моніторингу складається зі систематичної та випадкової складових і може бути визначена:

$$\delta_{\Sigma} = K \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} + t_{0,99} \cdot (S_M + S_B), \quad (\text{Є.5})$$

де  $K = 0,8$  – коефіцієнт, що залежить від відношення границі систематичної складової похибки до стандартного відхилення випадкової складової (для умови  $0,8 \leq v \leq 12$ , де  $v = \Delta_{\text{с.дов}}/S_B = 0,041 / 0,0037 = 11,08$ );  $\delta_1$  – похибка позиціонування вимірювальних датчиків відносно пристрою управління;  $\delta_2$  – похибка, яка виникає при неправильному розташуванні вимірювальних датчиків;  $\delta_3$  – сумарна інструментальна похибка;  $S_M, S_B$  – відповідно, СКВ для методичної та стохастичної похибок;  $t_{0,99} = 2,89$  – квантиль розподілу Стюдента за довірчої ймовірності 0,99 при кількості проведених вимірювань  $n = 9$ .

Така похибка, згідно ISO 5725-1/6:2015 “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results”, не повинна перевищувати 5%, що гарантує дотримання необхідної точності та надійності вимірювання.

Значення відносної похибки (табл. Є.1):

$$\delta_{\Sigma} = 0,8 \cdot \sqrt{0,016^2 + 0,0104^2 + 0,014^2} + 2,89 \cdot (0,009 + 0,0037) = 0,044 \approx 4,4\% < 5\%.$$

Як бачимо, умова досягнення необхідної точності моніторингу згідно ISO 5725-1/6:2015 дотримана.

Табл. Є.1. Результати розрахунку складових сумарної похибки

Найменування похибки	Значення похибки моніторингу СС ДН	
	в умов. одиницях	у відсотках
Похибка позиціонування, $\delta_1$	0,016	1,6%
Похибка розташування вимір.датчиків, $\delta_2$	0,0104	1,04%
Сумарна інструментальна похибка, $\delta_3$	0,014	1,4%
Сумарна методична похибка, $\delta_M$	0,009	0,9%
Стохастична похибка, $S_\sigma$	0,0037	0,37%
Загальна похибка, $\delta_\Sigma$	0,0309	3,1% < 5%

Проте, проведення випробувань ІВС в звичайних (не ідеалізованих) умовах може збільшувати сумарну похибку до значень, що перевищують значення визначене в стандарті, що є недопустимим.

Таким чином, проведені вище прикладні (перевірочні) розрахунки похибки показали, що чітке дотримання параметрів геопозиціонування та встановлення вимірювального датчика, методики вимірювання, а також метрологічних параметрів розроблюваної ІВС дозволяють забезпечити необхідну точність отримуваних такою системою результатів моніторингу.

## Додаток Ж.

### Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес ЧДТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Черкаського державного  
технологічного університету,  
д-р. політ. наук, доцент



О.О. Григор

2020 р.

АКТ

**про впровадження в навчальний процес  
кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій  
Черкаського державного технологічного університету  
матеріалів дисертаційного дослідження Топтун Анни Володимирівни**

Основні результати дисертаційної роботи Топтун А.В. використані при викладанні фахових дисциплін циклів професійно-практичної підготовки студентів за спеціальностями 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» (дисципліни «Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин», «Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів», «Інтелектуальні технології вимірювання») та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (дисципліни «Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи», «Інтелектуальні технології вимірювання»).

В навчальний процес впроваджені, зокрема, такі результати, отримані автором:

Отримані наукові та практичні результати	Дисципліна, у яку впроваджено отримані результати	Вид занять, де використані отримані результати
Методичне, технічне та програмне забезпечення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу санітарного стану деревних насаджень, яке дозволило: підвищити точність на 12,5 – 15,0%, збільшити швидкість проведення моніторингу на 65 – 80% та забезпечити високу надійність роботи усіх блоків системи (ймовірність безвідмовної роботи зростає з 0,89 – 0,93 до 0,95 – 0,97)	«Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин»	Лекція на тему «Методи підвищення метрологічних характеристик приладів та систем контролю і моніторингу»
Комплекс оригінальних авторських методик для визначення впливу значущих факторів зовнішнього середовища на санітарний стан деревних насаджень (методика визначення показників <i>pH</i> та солоності ґрунту в зоні кореневого живлення дерева, методика експрес-визначення якісних показників деревного соку)	«Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів»	Практична робота «Методики для визначення впливу кліматичних факторів на стан об'єктів дослідження»



<p>1. Динамічна нейромережева модель, реалізована за механізмом нечіткої логіки (алгоритмом Мандамі) та центроїдним методом дефазифікації, що вперше була використана в математичному апараті санітарного стану деревних насаджень (при формуванні бази правил), чим дозволила підвищити точність визначення категорій санітарного стану дерев.</p> <p>2. Розроблений та програмно реалізований алгоритм визначення санітарного стану деревних насаджень, що дозволяє враховувати зміну якісних показників деревного соку в залежності від значущих параметрів зовнішнього середовища, в реальному часі отримувати розподіл деревних насаджень за категоріями на основі даних моніторингу їх санітарного стану, а також дозволяє прогнозувати життєвий цикл деревних насаджень</p>	<p>«Інтелектуальні технології вимірювання»</p>	<p>Лекція на тему «Нейромережеве моделювання в інтелектуальних технологіях вимірювання»</p> <p>Практична робота «Розрахунок та прогнозування життєвого циклу об'єктів вимірювання»</p>
<p>Метод автоматизованого визначення санітарного стану дерев, який, на відміну від існуючих, враховує вплив значущих факторів зовнішнього середовища на якісні показники деревного соку та дозволяє дистанційно і оперативно проводити зонування деревних насаджень за категоріями їх санітарного стану з можливим прогнозуванням динаміки змінення меж цих зон в часі</p>	<p>«Автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи»</p>	<p>Лекція на тему «Автоматизація методів вимірювання та контролю параметрів у інформаційно-вимірювальних системах»</p>

Начальник навчально-методичного відділу,  
канд.екон.наук, доцент

В.о. декана факультету  
електронних технологій і  
робототехніки, канд.техн.наук

Завідувач кафедри  
приладобудування, мехатроніки та  
комп'ютеризованих технологій,  
канд.техн.наук, доцент

С.М. Мильніченко

А.М. Чорній

Ю.Ю. Бондаренко

### Додаток 3

#### *Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України*

1. **А. Топтун**, та Ю. Бондаренко, “Розробка комплексного методу визначення санітарного стану деревних насаджень Бондаренко”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. №2, с. 5-13, 2020.

2. **А. Топтун**, та Ю. Бондаренко, “Зонування деревних насаджень за показаннями датчиків для дистанційного вимірювання якісних характеристик ґрунту”, *Вісник Київського політехнічного інституту. Сер. Приладобудування*. – 2020. – Вип. 59 (1). – С. 57-62.

#### *Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Європейського Союзу*

3. **А. Топтун**, and Yu Bodarenko “Negative factors affecting the sanitary status of tree plants and effective approaches to their research”, *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. vol. 66, no 1, pp. 42-45, 2020.

4. **А. Топтун**, and Yu. Bondarenko, “Information-measuring system for monitoring the sanitary condition of tree stands”, *International scientific journal "Industry 4.0"*. No 3. pp. 142-147, 2020

#### *Матеріали й тези конференції*

5. **А. Топтун**, та Ю. Бондаренко. “Огляд методів пошуку дефектів в зелених насадженнях,” на *I Всеукраїн. наук.-практ. конф. «Наука України – погляд молодих вчених крізь призму сучасності»*, 20-22 квітня 2017 року». Черкаси, 2017, с. 55-57