

## ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЯ МАСТИЛЬНИХ ОЛИВ У ЗМІННОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Ів. Іг. Шостаківський\*, Іг. Ів. Шостаківський

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: shostakivsky@gmail.com

Обґрунтовано необхідність розроблення методики оцінки стану мастильних олиव з акцентом на можливості використання у певних видах обладнання з врахуванням конкретних експлуатаційних та технологічних вимог. Для вирішення поставленої задачі проаналізовано процеси старіння олив загалом, та окрему увагу приділено механізмам утворення розчинних та нерозчинних сполук в початково діелектричному середовищі. На думку авторів, інтенсивність утворення таких речовин та ступінь їх накопичення можуть слугувати одним із критеріїв оцінки стану придатності оливи як невід'ємної частини механічної системи загалом, так і в якості мастильного матеріалу зокрема. З метою експрес-діагностики олив та для розширення можливостей вивчення процесів зміни стану складних багатокомпонентних сумішей було запропоновано використання діелектрометрії у змінному електричному полі, оскільки відомі та описані досі методики вивчення зміни провідності діелектричних рідин в умовах постійного електричного поля, на думку авторів, накладають певні обмеження. Для підтвердження запропонованої теорії авторами запропоновано лабораторну установку, яка би дала змогу дати відповідь на запитання щодо якісної можливості подальшого використання оливи та певною мірою прогнозувати зміни її стану на тих чи інших видах обладнання. Отримані експериментальні результати демонструють зміни падіння потенціалу у відібраних пробах з різним ступенем забрудненості, що відображає накопичення та певну орієнтацію полярних частинок у змінному електричному полі. В результаті серії експериментів були визначені оптимальні геометричні розміри вимірювального пристрою та умови вимірювання відповідно. Додатково було проведено експериментальні дослідження оливи з попередньо заданим вмістом шламів та механічних забруднень. Експериментальні залежності загалом підтверджують гіпотези авторів та запропонований підхід щодо оцінки якості олив.

Ключові слова: олива, електричне поле, полярні сполуки, старіння олив, шлами, механічні забруднення.

The article substantiates the need to develop a methodology for assessing the state of lubricating oils with an emphasis on the possibility of use in certain types of equipment, taking into account specific operational and technological requirements. To solve this problem, the aging processes of oils in general have been analyzed, and special attention was paid to the mechanisms of formation of soluble and insoluble compounds in the initially dielectric medium. According to the authors, the intensity of formation of such substances and the degree of their accumulation can serve as one of the criteria for assessing the suitability of oil, as an integral part of the mechanical system in general and as a lubricant in particular. In order to quickly diagnose oils and to expand the possibilities of studying the processes of changing the state of complex multicomponent mixtures, the use of dielectrometry in an alternating electric field was proposed. To confirm the proposed theory, the authors proposed a laboratory installation that would answer questions about the quality of further use of oil and to some extent predict changes in its condition on certain types of equipment. The obtained experimental results show changes in the potential drop in the selected samples with different degrees of contamination, which reflects the accumulation and a certain orientation of polar particles in an alternating electric field. As a result of a series of experiments, the optimal geometric dimensions of the measuring device and the measuring conditions were determined, respectively. In addition, experimental studies of oil with a predetermined content of sludge and mechanical contaminants were performed. Experimental dependencies generally confirm the authors' hypotheses and the proposed approach to assessing the quality of oils.

Key words: oil, electric field, polar compounds, oil aging, sludge, mechanical pollution.

Сучасний мастильний матеріал є документальною. Проте, єдиним параметром, за яким зазвичай визначається межа працездатності мастильного матеріалу, є ресурс, зазначений в інструкції з експлуатації механізмів та агрегатів або в документації на мастильний матеріал. Тож, вироблення встановленого ресурсу мастильним матеріалом

Сучасний мастильний матеріал є невід'ємним елементом механічної системи, тому на нього поширюються такі властивості, як: безвідмовність, довговічність, збережувальність, а також працездатність, за якої він здатний виконувати конкретні функції, утримуючи значення заданих параметрів в межах, установлених нормативно-технічною

можна інтерпретувати як відмову його як елемента механічної системи.

З іншого боку, сукупність стандартів на оливи, а також на методи визначення їх властивостей базуються на умовних показниках або на умовних засобах їх визначення за недостатньої кореляції з реальними умовами експлуатації. Стандартними методами випробовувана можна оцінювати лише свіжі оливи, оскільки процедура реалізації багатьох визначень потребує видалення з випробовуваних зразків забруднень, зневоднювання, гомогенізації тощо. З іншого боку, методи випробовування, що розробляються виробниками олив або авторами їх рецептур, мають явно виробничий, проте вузькоспеціалізований характер.

На даний час існує безліч систем, методів та показників для оцінки мастильних матеріалів, але жоден з них, на жаль, не спроможний повною мірою задовольнити споживачів. Об'єктивно кажучи, в світі не існує підходу за яким можливо однозначно поставити діагноз: чи може даний мастильний матеріал використовуватися на даному обладнанні і, якщо так, то яким є його оптимальний термін його служби.

У зв'язку з наведеним вище, вибір параметрів, що дозволяють характеризувати інтенсивність старіння оливи і дати висновок щодо можливостей її використання представляють великий практичний інтерес. Сучасні критерії і методи оцінки властивостей мастильних олив повинні об'єктивним чином характеризувати їх експлуатаційну придатність як у період зберігання, так і у процесі роботи.

Основи теорії старіння олив, зазвичай, описують процеси, перевірені або констатовані в умовах експерименту [1]. Зміни стану, визначені за стандартними критеріями, були проаналізовані в [2] і, як було встановлено, мають суттєву розбіжність та загалом не відображають специфіку реальних умов роботи мастильних матеріалів. В переважній більшості робіт за даною тематикою проводиться окремо аналіз змін основних властивостей нафтопродуктів у лабораторних умовах за так званим принципом "in vitro" або оцінки експлуатаційної придатності олив шляхом моторних випробувань за вузькофокусованими методиками виробників, що орієнтовані на відповідності сучасним європейським вимогам щодо двигунів та матеріалів.

Аналіз змін у співвідношенні обсягів витрати олив до витрати пального демонструє, що тенденція до зменшення питомого

споживання перших до других спричинена не стільки змінами у схемі раціонального використання мастильних матеріалів, а, насамперед, застосуванням більш досконалих систем змащування в сучасних машинах та агрегатах. У зв'язку із цим для уточнення понять та формулювань у сфері визначення напрямів застосування вимірюваних оціночних критеріїв стану експлуатаційних рідин (зокрема – олив) необхідно визначити напрями змін стану цих рідин саме з врахуванням потенційних та фактичних експлуатаційних впливів. З досвіду проведених експериментів [2] та узагальнення теоретичних уявлень, варто розглянути наступну систему поглядів на питання еволюції стану мастильних олив у різних умовах експлуатації.

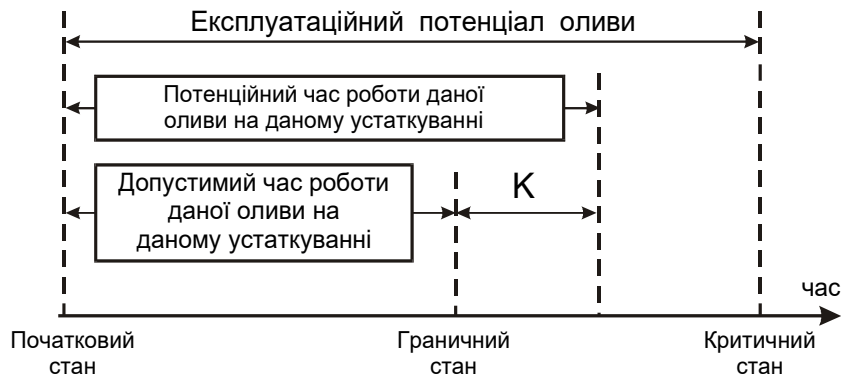
Стан мастильної оливи слід розглядати та визначати як макроскопічну суперпозицію змін у часі [3] фізико-хімічних властивостей, які відбуваються під час експлуатації. Хімічні та термічні чинники діють на оливи безперервно, причому перші, зазвичай, призводять до незворотних процесів старіння. Також, незворотні зміни в моторних та трансмісійних оливах, як правило, спричиняються термічними впливами. Оливи, що працюють в машинах та обладнанні, що не є тепловими об'єктами (трансмісії, турбіни тощо) нагріваються за рахунок температури у трибоспряженнях. Однією із задач таких олив є відведення тепла із зони тертя, проте температура, якої вони досягають, є, безперечно, нижчою за температуру моторних олив. Тому зміни стану трансмісійних олив будуть відбуватися, в основному, за рахунок процесів окислення. Як хімічні, так і термічні продукти старіння олив характеризуються високою полярністю. Накопичення полярних сполук в початковий період викликати різкі зміни діелектричних параметрів (наприклад, проникності або падіння потенціалу в змінному електричному полі). Подальший приріст полярних з'єднань призводить до стабілізації діелектричних властивостей, що унеможливує об'єктивну оцінку впливу неполярної основи, тобто компонентів оливи, які не зазнали змін. Одночасно з цим певні концентрації полярних продуктів інтенсифікують сорбцію частинок на поверхні метала, чим сприяють утворенню більш міцних мастильних плівок [3].

Навіть, у випадку, якщо до обладнання буде підібрано оливу, яка ідеально відповідає експлуатаційним вимогам, внаслідок постійних змін стану – старіння (коксо- і смолоутворення – процесів

окислювання і термічного впливу) з часом вона неминуче стає непридатною для експлуатації. Підбір мастильної оливи для конкретних умов повинен враховувати її зміни стану в часі і відповідні зміни обладнання, що змащується, таким чином, щоб приблизно на половині передбаченого ресурсу оливи її стан

меншим часу досягнення граничного стану, тобто необхідно ввести деякий запас безпеки, експериментально визначений для статистично обраної групи устаткування [3].

Оливи, для яких теплові умови не спричиняють досягнення температури порядку



К – експлуатаційний запас безпеки

**Рисунок 1 – Зміни стану мастильних оливи в процесі експлуатації**

оптимально відповідав експлуатаційним вимогам. Зміни стану мастильних оливи у часі можна зобразити умовною графічною залежністю (рис. 1) [3].

Очевидно, що олива виконує свої функції у трибоспряженні до моменту втрати мастильних властивостей. Їх вичерпання відбудеться тоді, коли продукти смолоутворення та конденсації стануть домінуючими по відношенню до незмінних компонентів оливи. Таким чином, критичний стан у мастильному середовищі виникне після перевищення порогу діелектричного насичення, коли домінуючим стане негативний вплив полярних з'єднань. Олива, яка досягла такого стану, не може застосовуватися в жодному обладнанні, а час переходу від початкового до критичного стану є потенційним періодом її застосування як мастильного матеріалу [3].

Граничного стану мастильна олива досягає в результаті конструкційних та експлуатаційних впливів у вузлах тертя. Цього стану буде досягнуто, якщо відбудеться відмова обладнання, що змащується (наприклад, задир) або якщо в процесі роботи виникнуть зміни, які перевищують прогнозовані значення зносу та вимагатимуть ремонту обладнання [1]. Після досягнення граничного стану для даного обладнання мастильна олива може застосовуватися для змащення іншої техніки з нижчим рівнем експлуатаційних впливів та вимог, або направлена на регенерацію. Проте, допустимий час роботи оливи в устаткуванні повинен бути

100 °С і які не потребують доливу через вигорання, змінюють свій стан за умовною кривою, зображеною на рис. 2.

Процес зміни стану (старіння) характеризується малими приростами і відбувається під час активації складових оливи. Процес активації триває до умовного часу  $t_1$ , після якого відбуваються різкі зміни стану, викликані досягненням необхідної енергії активації певною кількістю мікрочастинок оливи. При цьому утворюється велика кількість полярних продуктів старіння, що викликають зміни, пов'язані здебільшого з процесами зносу обладнання, і досягається граничний стан системи. В часовому інтервалі від  $t_0$  до  $t_1$  з оливи під час роботи можуть випадати в осад тверді продукти старіння, утворені великою кількістю хімічних сполук з різною взаємною активністю та активністю до кисню, який присутній в оливі. Таким чином, крива змін, зображена на рис. 2, є результативною сумуючою кривих зміни стану окремих хімічних компонентів оливи. Для об'єктів, робоча температура яких перевищує 100 °С та існує необхідність у поповненні системи змащування, процес зміни стану умовно представлений на рис. 3. Аналізуючи цей процес, можна зробити висновок, що початкова кількість оливи в максимальному об'ємі в момент  $t_1$  активується і входить в інтенсивні термохімічні реакції, різко змінюючи свій стан. Як доводять дослідження різних хімотологічних шкіл, початково різкі зміни стану поступово сповільнюються з витратою

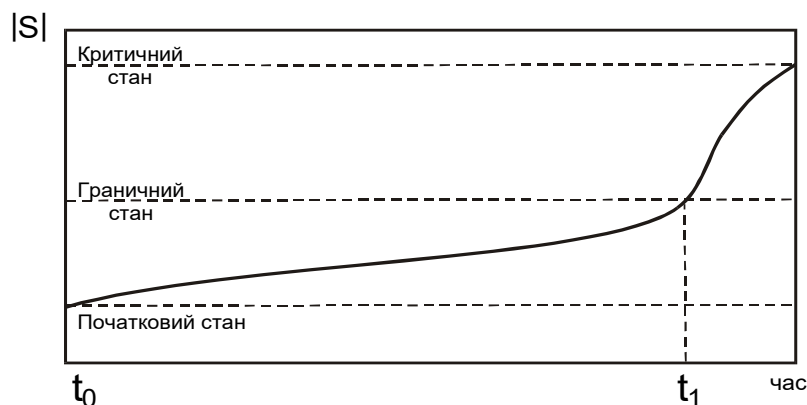
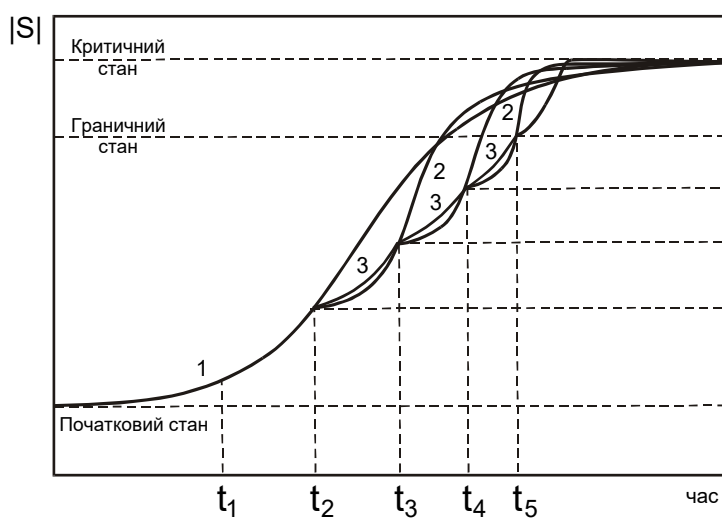


Рисунок 2 – Характер зміни стану мастильної оливи в процесі роботи за температури, що не перевищує 100 °С



1 - зміна стану вихідної оливи

2 - зміна стану періодичних добавок оливи

3 - результативна крива зміни стану оливи

Рисунок 3 – Характер зміни стану оливи в устаткуванні за температури вище 100 °С

компонентів реакцій та накопиченням їх продуктів. Приріст останніх, відповідно до принципу Ле Шательє-Брауна, гальмує швидкість хімічних процесів. Таким чином, реакції протікають повільніше – пропорційно зростанню кількості продуктів конденсації і смолоутворення, а стан мастильної оливи змінюється до критичного, після настання якого олива перетворюється в кокс [3].

Введена в момент  $t_2$  перша добавка свіжої оливи в значно меншому об'ємі викликає сумарну зміну стану оливи. Досягнення цієї добавкою критичного стану через меншу кількість субстратів відбувається швидше. Кожна наступна така добавка свіжої оливи в період часу від  $t_3$  до  $t_4$  за об'ємом буде меншою попередньої при постійному об'ємі системи мащення і при виключенні витоку оливи.

Приріст кількості продуктів окислення та термодеструкції буде фізично спричиняти

обмеження можливості кількісного поповнення системи свіжою оливою. Результативна крива зміни стану мастильної оливи в таких умовах буде складатися із середніх значень відрізків кривої 1 і кривих 2. Вона буде випереджати всі зміни стану змащованого устаткування до моменту, коли експлуатаційні властивості мастила настільки відхиляться від необхідного рівня, визначеного рівнем експлуатаційних впливів, що рівень спрацювання вузла буде перевищувати прогнозовані величини для даного часу експлуатації устаткування [3].

Аналізуючи процеси старіння як незворотні процеси зміни мастильних оливи в часі, з врахуванням результатів різних дослідницьких шкіл, можна сказати, що метрологічно вірними для оцінки вказаних станів можуть бути раціональні критерії, які відображають явища взаємодії активно діючих компонентів мастильних оливи та вузлів тертя.

Чиста, свіжа олива є неполярною рідиною. Термохімічні процеси, що відбуваються в умовах реальної експлуатації, можуть призводити до геометричної асиметризації компонентів (продукти окислення), що, в свою чергу, повинно викликати підвищення їх полярності. Поступове накопичення полярних продуктів, ще розчинних у вуглеводнях, які не зазнали змін, може довести їх концентрацію (залежно від температури) до критичної. За цієї концентрації можна очікувати суттєвих змін діелектричної проникності, яка для критичних концентрацій і температури приймає максимальне значення. Таким чином, можна припустити, що за умови нехтування розчинником (незмінної основи оливи) в зонах значних скупчень полярних продуктів виникають взаємодії, механізм яких зумовлений тільки цими продуктами. Базова олива, основу якої складають неполяризовані частинки, не буде суттєво змінювати свою проникність навіть у дуже сильному електричному полі. Тим більше, що речовини, схильні до поляризації, окислюються в першу чергу [4].

Момент максимального росту діелектричної проникності буде характеризувати явища діелектричного насичення. Логічно припустити в цьому випадку, що зміни діелектричної проникності як функції часу експлуатації можуть слугувати показником ступеня старіння мастильної оливи, як такі, що належать до групи об'єктивних показників. Значення проникності, виміряні у змінному електричному полі, можуть характеризувати дипольну та орієнтаційну поляризацію. Орієнтаційна поляризація, в свою чергу, може бути використана для визначення молярної поляризації, яку аналогічно рефракції можна розглядати як функцію стану. Аналізуючи літературні джерела та виходячи з того, що кожна хімічна сполука має свою резонансну частоту, можна також зробити висновок про можливість визначення за рівнем діелектричних втрат не тільки стану оливи, але і їх хімічного складу. Максимум електричної добротності при резонансній частоті, яка відповідає мінімуму діелектричних втрат, може характеризувати присутність і навіть кількість певних хімічних сполук з відомою молекулярною масою і дипольним моментом. Такі дослідження, на жаль, вимагають дорогої та складної матеріально-лабораторної бази. Проте, слід зауважити, що оскільки сучасні мастильні матеріали є складною сумішшю десятків активних сполук, що реагують між

собою, то логічним є те, що прикладні дослідження не вимагають визначення власне хімічного складу оливи під час експлуатації, а необхідним та практично цікавим є визначення відносних змін стану цих оливи, як похідної змін хімічного і, відповідно, фракційного складу [4].

В багатьох роботах, що проводилися досі та присвячених оцінці властивостей нафтопродуктів, значна увага приділялася вивченню провідності (опору) в умовах постійного електричного поля. На думку авторів, такі дослідження мають деякі обмеження, оскільки характеризують тимчасові значення в певних, визначених розчинах. Натомість, дослідження провідності (падіння потенціалу), реалізовані у змінному електричному полі, можуть характеризувати процеси зміни стану багатокомпонентних сумішей. Діелектричні дослідження повинні відображати, по суті, будь-які зміни стану діелектрика (в даному випадку мастильних оливи), як похідні результати хімічних та фізичних процесів у досліджуваних середовищах, включно із їх обводненням та забрудненням. Важливо, щоб результати таких досліджень та випробувань корелювалися також із змінами змашуваних вузлів тертя таким чином, який дозволив би для даного виду обладнання визначити та зафіксувати параметри, що відповідають граничному стану і перевищення яких вказує на подальшу експлуатаційну непридатність мастильної оливи. Дослідження зносу пар тертя, однак, є відносно дорогими та довготривалими. Таким чином, спочатку необхідно відповісти на запитання, чи відрізняються (і якщо так, то якою мірою) дослідження зміни стану мастильних матеріалів за допомогою діелектричних параметрів з врахуванням їх можливої чутливості до градації взірців оливи, на які діють різноманітні експлуатаційні фактори. Другим суттєвим питанням має бути експериментальна перевірка гіпотези про виникнення в результаті старіння мастильних оливи зміни їх діелектричних властивостей та збереження в часі цих змін на певному незмінному рівні [4].

Як було зазначено вище, переважна більшість досліджень провідності або опору нафтопродуктів проводилися в постійному електричному полі. Отримані за таких умов дані дають інформацію про тимчасові зміни відповідних властивостей без врахування сутності процесу поляризації, яка, в свою чергу, може бути джерелом інформації щодо змін стану мастильних оливи в процесі

експлуатації. Конденсатор, розташований в синусоїдальному змінному електричному полі, не створює можливості протікання струму, проте впливає на різницю фаз напруженості поля та електричної напруги. При цьому вплив індуктивності кола є суттєвим для змін магнітного поля, але у випробуваннях виключно ємнісного характеру модуль імпеданса такого кола з послідовно з'єднаних ємності  $C$  і опору  $R$  за частоти  $f$  буде визначатися як:

$$Z = \sqrt{\eta^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}\right)^2} \quad (1)$$

З рівняння (1) очевидно, що при постійному опорі системи із збільшенням частоти імпеданс кола буде зменшуватися як і при збільшенні ємності конденсатора за умови постійної частоти. За формулою ємнісного опору конденсатора

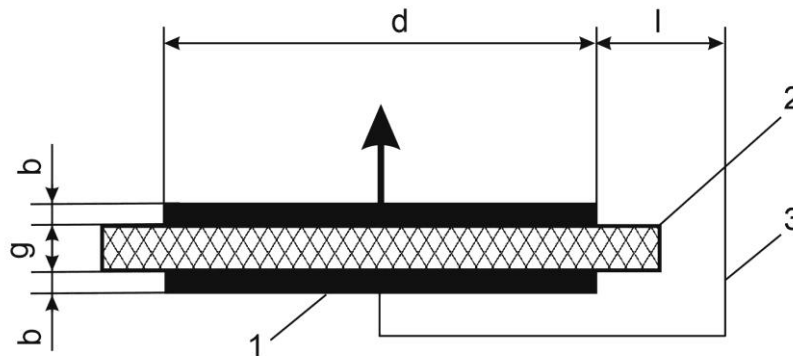
$$C_{gp} = 0.0695 \frac{d^2}{g}, \quad (3)$$

де:  $d$  – діаметр електрода,  $g$  – товщина дослідного взірця. Гранична ємність конденсатора  $C_{bd}$  з діаметром електродів  $d$  розраховується як:

$$C_{bd} = \frac{d}{0.041 \cdot \varepsilon - 0.077 \cdot \lg g + 0.045} \quad (4)$$

Розраховані відповідно за формулами (3) і (4) значення ємності  $C_{gp}$  и  $C_{bd}$  для вимірювальної схеми, що застосовується, демонструють відсутність загрози пробую дослідного зразка в інтервалі від 1 до 5 мм. При цьому гранична розрахункова ємність є близькою до геометричної за умови, що  $\varepsilon = 2,5$ , а проєктний діаметр електрода  $d=28$  мм.

Змінне електричне поле, прикладене до обкладок конденсатора резонатора, викликає часткову орієнтаційну поляризацію у



1 – електроди; 2 – шар діелектрика; 3 – під'єднання нижнього електрода

Рисунок 4 – Схема системи електродів

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (2)$$

можна розрахувати його відповідні значення для різних ємностей вимірювального конденсатора за заданих частот. Цей розрахунок необхідний для проєктування такого вимірювального конденсатора, в якому не виникне пробую після його підключення до лабораторного генератора з номінальною входною напругою  $U_g = 10V$ , входним опором  $R_g = 600 \Omega$ , значенням опору дільника напруги  $R_d = 100 \Omega$ . Запропонована (рис. 4) система усуває можливість виникнення явища провідності у дослідних взірцях між верхнім електродом та з'єднувачем нижнього електрода (поз.3 на рис. 4).

Геометрична ємність конденсатора  $C_{gp}$  визначається [6] за формулою

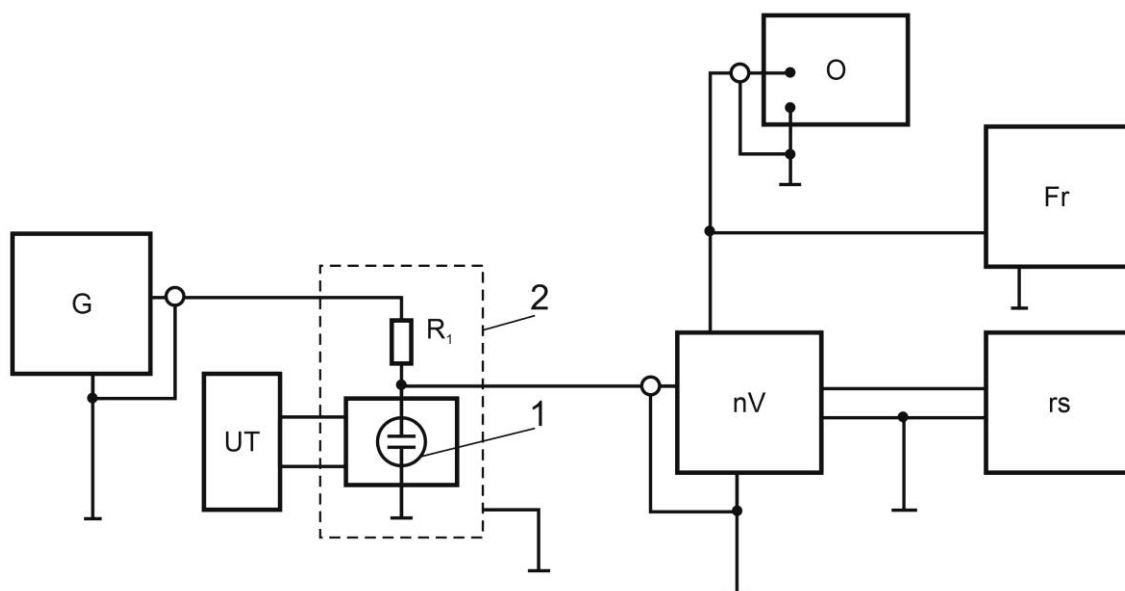
досліджуваному середовищі з постійним дипольним моментом  $\mu$ . Це, в свою чергу, викликати збільшення провідності оливи, і характеризуватиметься зменшення її ємнісного опору  $X_c$ , що, зрештою, призведе до зменшення значення падіння напруги. Прикладене зовнішнє поле може індукувати дипольні моменти в тих частинках, які тільки починають окислюватися, тому очікується, що падіння потенціалу не повинно мати лінійний характер. Ріст концентрації полярних продуктів до значень, близьких до критичних, породжується впливом розчинників із незмінною органічною основою. У цьому випадку вимірювання падіння потенціалу буде можливим лише для полярних продуктів, а його значення повинно стабілізуватися в часі.

На основі згаданих міркувань запропоновано вимірювальну систему, схема якої зображена на рис. 5. Вона складається з

таких елементів: 1 – вимірювальний резонатор; 2 – екран з латунної сітки;  $nV$  – селективний нановольтметр з інтервалом частот від 1,5 до 150 кГц, чутливістю від 1 до 100 мкВ, регульований через кожні 10 дБ та обладнаний інтерфейсом для підключення до ЕОМ; G – RC-генератор з інтервалом частот від 10 Гц до 200 кГц та номінальною вихідною напругою синусоїдального характеру до 10  $V_{sk}$ ; Fr – вимірювач частоти для контролю частоти генератора; rs – реєстратор для контролю стабільності роботи та визначення чутливості вимірювальної системи, а також для реєстрації часу стабілізації падіння напруги; UT – рідинний ультратермостат для стабілізації температури резонатора в інтервалі до 150 °С; R – дільники напруги  $R_1 = 100\text{кОм}$ ; O – осцилоскоп (або ЕОМ, оснащена АЦП з відповідним інтерфейсом) для реєстрації та дослідження зміни напруги під час виконання вимірювань.

Стабільність роботи запропонованої системи можна проконтролювати, періодично вимірюючи значення падіння потенціалу для резонатора в повітрі та порівнюючи його з установленим граничними, яке для зручності проведення експерименту доцільно прийняти рівним 100 нВ. За допомогою стенда, зібраного за схемою, зображеною на рисунку 5, були проведені (автором під час стажування в Університеті технологій та гуманітарних наук ім. Казимира Пуласького в м. Радом, Республіка Польща) дослідження змін падіння напруги в оливі "SAE 30" за різних частот в усьому діапазоні вимірювання селективного нановольтметра. Вимірювання проводилися за трьох температур: 25, 50 та 100 °С таким чином, щоб для найбільшої товщини шару – 5 мм та найнижчої частоти – 1,5 кГц при встановленій вихідній напрузі генератора показ нановольтметра складав 100 мВ. Такі умови вимірювань були збережені для всіх трьох значень температури з метою забезпечення подальшої можливості спостереження та аналізу результатів співставимих експериментів щодо змін падіння потенціалу як товщини шару оливи для будь-якої з обраних частот. Результати вимірювань представлено відповідно на рисунках 6 – 8, які демонструють, що зі збільшенням частоти зменшується інтервал зміни падіння потенціалу для всіх температур, причому через зменшення в'язкості оливи з ростом температури спостерігається логічне збільшення можливості орієнтації частинок у змінному електричному полі. Тому для частоти 150 кГц за температури

100 °С фіксується найнижче падіння потенціалу. В той же час вище певного значення товщини основи "SAE 30" падіння потенціалу не спостерігається, що, ймовірно, пов'язано з істотним ростом опору. Інтервал змін падіння потенціалу найкраще спостерігається в межах товщини шару від 1 до 1,5 мм залежно від температури досліджуваної оливи.



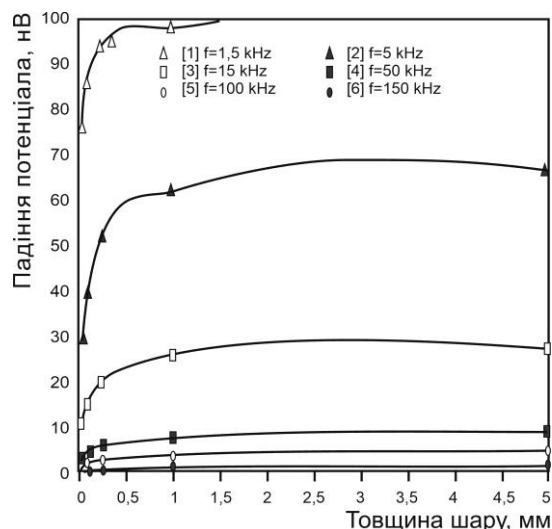
1 – вимірювальна комірка; 2 – електричний екран; G – генератор; rs – реєстратор; nV – селективний нановольтметр; Fr – вимірювач частоти;  $R_1$  – резистор 100кОм; O – осцилоскоп; UT – універсальний термостат

**Рисунок 5 – Структурна схема вимірювального станда**

Для вибору оптимальних умов вимірювання падіння потенціалу була проведена серія експериментів, під час яких за кожної температури для товщини шару 5 мм і кожної частоти встановлено початкове значення потенціалу 100 мВ. Результати досліджень представлені на рисунках 9 – 11.

Через можливість інтенсивного випаровування досліджуваної оливи за найвищої температури проведення експериментів (100 °С), а також небезпеки суттєвого окислення дослідних зразків було зроблено припущення, про те, що найбільш оптимальною температурою для описаних досліджень буде температура 50 °С, за якої процеси випаровування будуть мінімальними, а відповідна в'язкість досліджуваних середовищ забезпечить велику і достатню роздільну здатність вимірювань при одночасному переході вуглеводнів, здатних утворювати каркас кристалічної ґратки в рідкий стан.

Вимірювання падіння потенціалу за частоти 150 кГц найбільш відхилені від лінійності у досліджуваному діапазоні товщин шару. Це може свідчити про ймовірність виникнення індукованих дипольних моментів в компонентах досліджуваної оливи за умов сильного електричного поля та певних молекулярних мас. Для змін падіння потенціалу за частоти 150 кГц, зображених кривими регресії другого ступеня найменше вимірюване значення складає



**Рисунок 6 – Залежність вимірюного падіння потенціалу від товщини шару "SAE 30" за температури 25 °С**



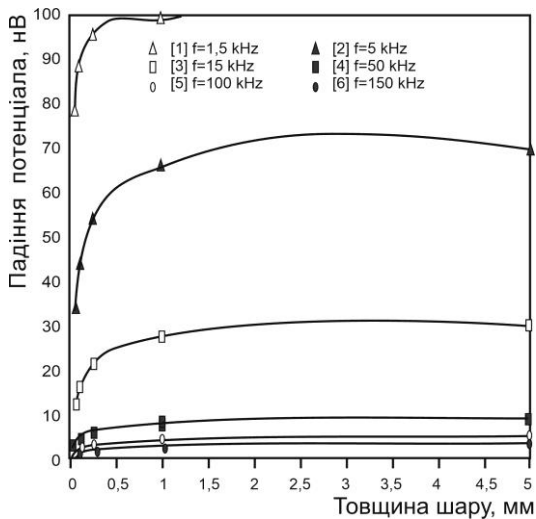


Рисунок 7 – Залежність виміряного падіння потенціалу від товщини шару "SAE 30" за температури 50 °С

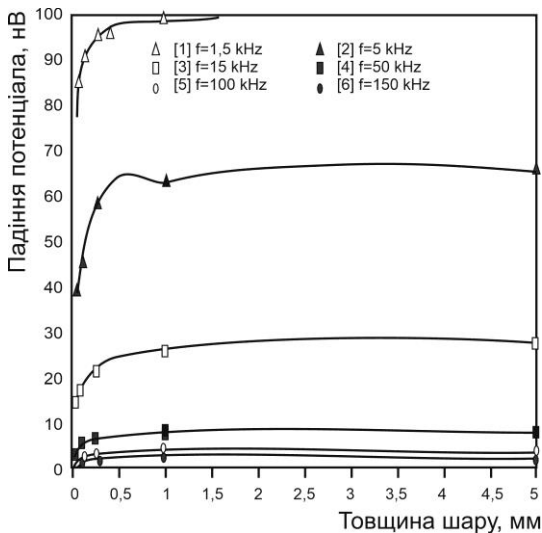


Рисунок 8 – Залежність виміряного падіння потенціалу від товщини шару "SAE 30" за температури 100 °С

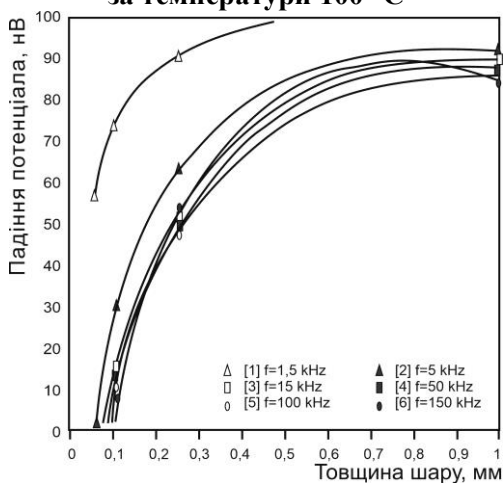


Рисунок 9 – Залежність виміряного падіння потенціалу від товщини шару "SAE 30" за початкового потенціалу 100 мВ та температури 25°С

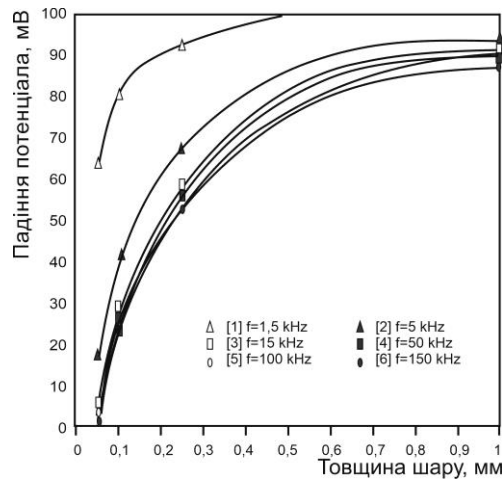


Рисунок 10 – Залежність виміряного падіння потенціалу від товщини шару "SAE 30" за початкового потенціалу 100 мВ та температури 50 °С

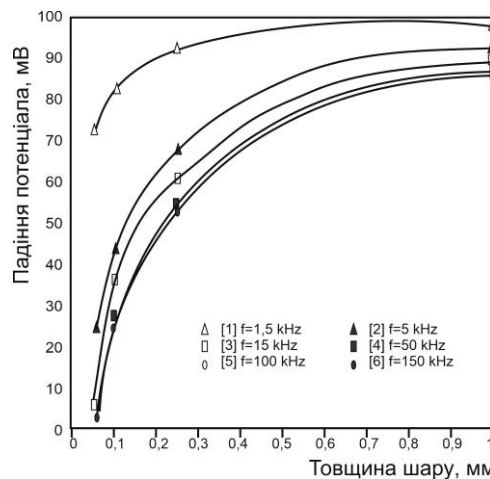
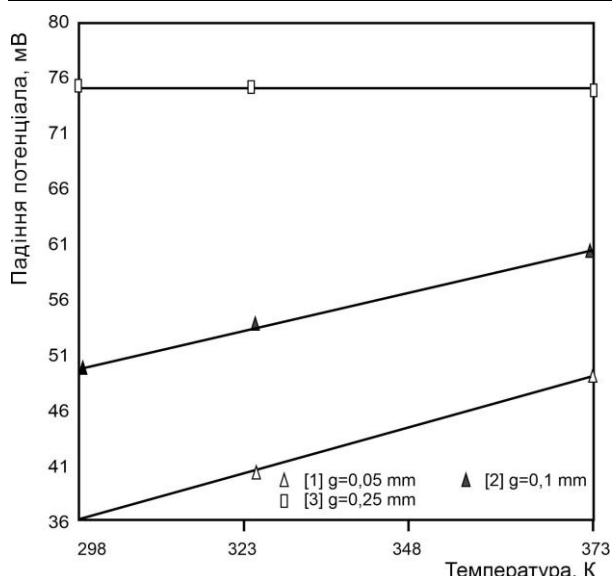


Рисунок 11 – Залежність виміряного падіння потенціалу від товщини шару "SAE 30" за початкового потенціалу 100 мВ та температури 100 °С

$\eta = 3.955 \cdot 10^{-2}$ , що найбільше відповідає критерію відтворюваності Кохрена. Відповідне рівняння кривої регресії, визначене експериментальним шляхом, для даної частоти матиме вигляд:

$$U_{150} = -7.191 \cdot g^2 + 8.844 \cdot g + 1.294 \quad (5)$$

Підтвердження правильності вибору умов вимірювання падіння потенціалу для оливи "SAE 30" та розчинів на цій основі наведено на рис. 12, на якому зображені зміни падіння потенціалу за частоти 150 кГц як функція температури для трьох значень товщини шару досліджуваної оливи.



**Рисунок 12 – Залежності падіння потенціалів від температури**

Як видно за характером графіків регресії, найкрутіший нахил кривої змін падіння потенціалу спостерігається для товщини шару  $g = 0,05$  мм. Рівняння регресії цієї кривої має вигляд:

$$U = 1.694 \cdot 10^{-1} \cdot \tau - 14.4 \quad (6)$$

для інших випадків рівняння регресії матиме вигляд:

для  $g = 0.1$ мм:

$$U = 1.294 \cdot 10^{-1} \cdot \tau + 11.62 \quad (7)$$

для  $g = 0.25$ мм:

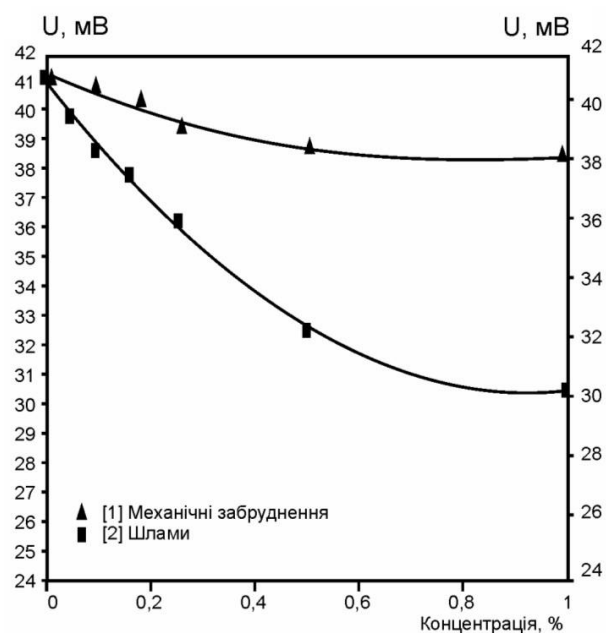
$$U = -3.713 \cdot 10^{-3} \cdot \tau + 75.86 \quad (8)$$

В серіях з трьох експериментів (мінімальний цикл для критерія Кохрена) було підтверджено найбільшу відтворюваність для кривої 1. Тому оптимальними умовами для визначення падіння потенціалу та подальших предметних досліджень для запропонованої вимірювальної системи слід вважати:

$$g = 0.05 \text{ мм}; T = 323 \text{ К (50}^\circ\text{C)}; f = 150 \text{ кГц.}$$

В рамках програми попередніх досліджень з відірацьованих олив "Superol CC SAE 3" шляхом екстракції бензолом були виділені забруднення. Отримані зразки сушилися за температури 105 °С, а виділені забруднення згодом розчинялися в масляній основі до здобуття розчинів з наперед визначеною фіксованою концентрацією 0.01, 0.05, 0.25, 1 і 5 % відповідно. Також з бензольного розчину, після випарення розчинника, шляхом екстракції н-пентаном були виділені шлами, які потім теж розчинялися при аналогічних концентраціях в оливній основі. За вище встановлених умов і певного режиму зміни зразків досліджувалися зміни падіння потенціалу для серії розчинів

забруднень і шламів різних концентрацій. Для отриманих результатів в інтервалі концентрацій до 1 % було складено відповідні рівняння регресії та побудовано графічні залежності (рис. 13) [2, 4].



**Рисунок 13 – Залежності падіння потенціалу від концентрації шламів та механічних забруднень**

Рівняння регресії для кривої 1 має вигляд:

$$U_z = 4.347 \cdot C^2 + 7.427 \cdot C + 41.18 \quad (9)$$

$$\text{при } S = 1.689 \cdot 10^{-4};$$

а для кривої 2, відповідно:

$$U_s = 12.49 \cdot C^2 - 23.29 \cdot C + 41.1 \quad (10)$$

$$\text{при } S = 8.109 \cdot 10^{-3}.$$

Залежності на рис. 13 демонструють, що найрізкіші зміни падіння потенціалу спостерігаються для сильно полярних шламів, як для продуктів окислення з міцним дипольним моментом. При концентраціях шламів вище 4 % значення падіння потенціалу стабілізується. Логічно зробити припущення, що при цьому досягається стан миттєвої переорієнтації полярних з'єднань при дуже малих значеннях часу релаксації в умовах зміни напрямку дії сил електричного поля. Іншими словами, за концентрації вище 4 % можна нехтувати впливом неполярного розчинника. Значно менш відчутні зміни падіння потенціалу пов'язані з наявністю механічних домішок і забруднень, які на своїм складом є різного характеру і, в першу чергу, збільшують ємнісний опір резонатора.

### Висновки

Отримані залежності демонструють, що найрізкіші зміни падіння потенціалу спостерігаються для сильно полярних шламів, як для продуктів окислення з міцним дипольним моментом, з подальшою їх стабілізацією при досягненні стану миттєвої переорієнтації полярних з'єднань при дуже малих значеннях часу релаксації в умовах зміни напрямку дії сил електричного поля.

Результати дослідження провідності у змінному електричному полі певним чином демонструють можливість оцінки зміни олів у процесі їх експлуатації та в результаті природнього старіння як похідних результатів хімічних та фізичних процесів у досліджуваних середовищах, включно із їх обводненням та забрудненням в кореляції із змінами змашуваних вузлів тертя. Теоретично обґрунтовано та експериментально перевірено гіпотезу щодо виникнення в результаті старіння мастильних олів зміни їх діелектричних властивостей та збереження в часі цих змін на певному незмінному рівні. Отримані результати дозволяють припустити, що запропонована методика дозволяє визначити та зафіксувати параметри, що відповідають граничному стану, перевищення яких вказує на подальшу експлуатаційну непридатність оливи як мастильного матеріалу для даного виду обладнання.

### Література

1. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення / Упор. В. Я. Чабанний. Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2008. 500с.
2. Шостаківський І. І., Харун В. Р. Обґрунтування діелектрометричного методу визначення змін трибологічних характеристик мастильних олів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2021. 2 (51). С. 16–22. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-16-22](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-16-22).
3. Шостаківський І. І. Зміни стану мастильних олів нафтогазопромислового обладнання у процесі експлуатації. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2002. № 4(5). С. 81-84.
4. Парайко Ю. І., Шостаківський І. І. Діелектрометричний метод контролю змін трибологічних характеристик олів трансмісії нафтогазового обладнання. *Проблеми тертя та зношування*. 2010. Вип. 53. С. 71-80.

5. Шостаківський І. І., Парайко Ю. І. Старіння мастильних олів та аналіз суперечностей систем оцінки їх стану. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2005. № 2. С. 74-79.

6. Biernat K. Ocena wlasciwosci normatywnych jako kryteriow charakteryzujacych przydatnosc olejow smarowych w eksploatacji. *Zeszyty naukowe IPE MCNEMT*, Radom, 1988.

### References

1. Palyvo-mastylni materialy, tekhnichni ridyny ta systemy yikh zabezpechennia / Upor. V. Ya. Chabannyi. Kirovohrad: Tsentralno-Ukrainske vydavnytstvo, 2008. 500 p. [in Ukrainian]
2. Shostakivskiy I. I., Kharun V. R. Rationale of the dielectrometric method of definition of lubricant oils tribological characteristics changes. *Scientific bulletin of Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas*. 2021. No 2(51). P. 16–22. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-16-22](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-16-22)
3. Shostakivskiy I. I. Zminy stanu mastylnykh olyv naftohazopromyslovoho obladnannia u protsesi ekspluatatsii. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2002 r. № 4(5). P. 81-84. [in Ukrainian]
4. Paraiko Yu. I., Shostakivskiy I. I. Dielektrometrychnyi metod kontroliu zmin trybolohichnykh kharakterystyk olyv transmisii naftohazovoho obladnannia. *Problemy tertia ta znoshuvannia*. 2010. Vyp. 53. P. 71-80. [in Ukrainian]
5. Shostakivskiy I. I., Paraiko Yu. I. Starinnia mastylnykh olyv ta analiz superechnosteii system otsinky yikh stanu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2005. № 2. P. 74-79. [in Ukrainian]
6. Biernat K. Ocena wlasciwosci normatywnych jako kryteriow charakteryzujacych przydatnosc olejow smarowych w eksploatacji. *Zeszyty naukowe IPE MCNEMT*, Radom, 1988. [in Polish]