

Войтов В.А.<sup>1</sup>,

Циба М.В.<sup>1</sup>,

Приймак А.В.<sup>2</sup>,

Чернявський В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний технічний  
університет сільського господарства,  
ім. П.Василенка,

<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних  
Сил ім. І. Кожедуба

E-mail: ndch\_khntusg@mail.ru

**ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АГРЕГАТІВ  
ТРАНСМІСІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ  
ЕМІСІЙНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ОЛИВ**

УДК 621.891; 621.316

У статті розглянуті питання застосування методу емісійного спектрального аналізу оливи для оцінки технічного стану агрегатів трансмісії. Запропонована загальна абразивна модель зношування деталей. Встановлений зв'язок між функціями похибок ідентифікації концентрацій елементів та імовірнісними показниками прийняття рішення діагностом про їх технічний стан.

**Ключові слова:** контроль технічного стану, емісійний спектральний аналіз оливи

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними програмами**

Вирішення проблеми забезпечення безвідмовності та довговічності агрегатів технічних систем різного призначення представляє собою важливу теоретичну та практичну задачу, актуальність якої є очевидною. Однак в останні декілька десятиріч до неї відмічається особливий інтерес, причому не лише із сторони організацій та фахівців, які займаються її створенням та науково-технічним супроводженням в експлуатації, але й із сторони безпосередньо експлуатуючих організацій. Пояснення цього лежить виключно в економічній площині і може бути визначене як фінансова не готовність експлуатуючих організацій до масової заміни існуючої номенклатури та якісного складу техніки у зв'язку із постійно зростаючою її складністю та вартістю. Саме останнє і є причиною прагнення більшості експлуатуючих організацій відійти від жорстко встановлених ресурсних показників, які притаманні системі технічної експлуатації за ресурсом та перейти до більш гнучкої системи експлуатації, яка б дозволяла здійснювати контроль та управління надійністю техніки виходячи із її фактичного технічного стану.

Продовження експлуатації техніки поза межами призначених показників потребує впровадження нових підходів та методів оцінки технічного стану як окремих агрегатів та систем, так і виробу в цілому. При цьому, на перше місце ставиться можливість забезпечення відповідних значень простоти застосування, повноти, глибини та достовірності контролю, які й визначають перспективність методу та його цінність для використання експлуатуючими організаціями.

Сьогодні існує велика номенклатура різноманітних методів та технологій здійснення контролю технічного стану об'єктів машинобудування. Однак застосування більшості з них потребує виконання відповідних конструктивних доробок, що характеризується значними затратами часу та, відповідно, пов'язане із значним часом простою, а тому їх застосування можливе лише в період планового технічного обслуговування (ТО). Це суттєво обмежує ефективність застосування методів щодо виявлення відмов систем на ранніх стадіях їх виникнення.

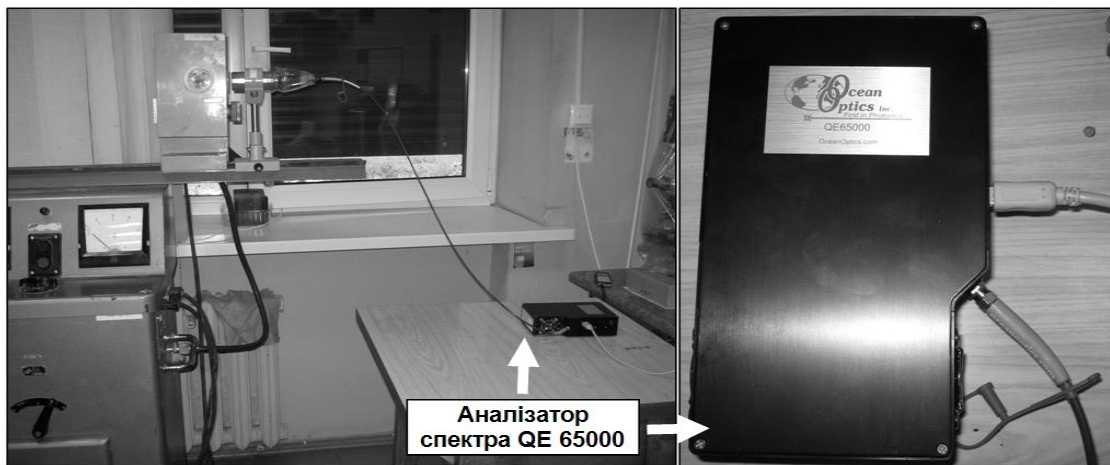
Аналіз робіт за напрямком досліджень. В роботах [1-4] показано, що одними з найбільш перспективних методів оцінки технічного стану систем об'єктів

машинобудування є методи, які базуються на прийнятті рішення за результатами аналізу вторинних ознак стану останніх. При цьому основною проблемою тут є саме вибір найбільш інформативної з них. Саме вирішенню цієї проблеми й присвячені роботи [5, 6]. Конкретно в них розглядаються питання застосування методу емісійного спектрального аналізу (ЕСА) оливи, як одного із тих, що найбільш повно задовольняє вимогам до методів експрес-аналізу технічного стану найбільш навантажених систем та вузлів об'єктів машинобудування, що підтверджується, до речі роботами [7 - 9].

Незважаючи на те, що положення методу ЕСА досить добре розроблені для авіаційних газотурбінних двигунів, для силових установок залізничного транспорту тощо, виникає багато запитань, коли мова йде про можливість його застосування для діагностування агрегатів технічних систем, що використовуються в умовах інтенсивного забруднення: техніки сільськогосподарського призначення; кар'єрної техніки тощо. Тут мають певні особливості щодо формування науково-методологічних основ застосування даного методу, а тому, метою даної роботи є дослідження цих особливостей та аналіз результатів застосування методу ЕСА для оцінки технічного стану вузлів та агрегатів техніки, що експлуатується в умовах інтенсивного забруднення.

### **Виклад основних положень матеріалу статті**

Оцінка технічного стану вузлів та агрегатів проводилася з використанням модернізованої установки МФС-3, особливістю якої є вузол реєстрації випромінювання - сучасний аналізатор спектра типу QE 65000. Загальний вид установки та аналізатора представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Модернізована установка спектрального аналізу оливи МФС-3**

Перед початком випробувань з метою виконання тарировки установки були приготовлені контрольні зразки, які готувалися із свіжої трансмісійної оливи ТАП-15п до складу якої вводили елементи у вигляді оксидів, а також пісок. Перед введенням хімічні елементи подрібнювалися шляхом розтиранням у ступці.

Поява включень хімічних елементів у оливі для різних агрегатів залежить від переліку конструкційних матеріалів з яких вони виготовлені. Для випадку дослідження коробок передач та головних передач сільськогосподарської техніки основними елементами, що підлягають контролю є: залізо (Fe) – основний елемент конструкційних матеріалів більшості складових коробок передач; мідь (Cu) – основний елемент мідних синхронізаторів та втулок; хром (Cr) та марганець (Mn) – основні легуючі елемент, що входить до складу конструкційних матеріалів коробок передач та головних передач, кремній (Si) – міститься у складі бруду та пилу й характеризує вплив умов експлуатації.

Для кожного із перерахованих елементів (Fe, Cu, Cr, Mn, Si) було приготовлено зразки типових олив з концентрацією від 3 до 1000 гр/т, які спалювалися в установці МФС-3. Результати після обробки аналізатором виводилися у вигляді спектрограм, що представляють собою залежності яскравостей від довжини хвилі  $\bar{L}(\lambda)$ , та відповідає елементу, який аналізується.

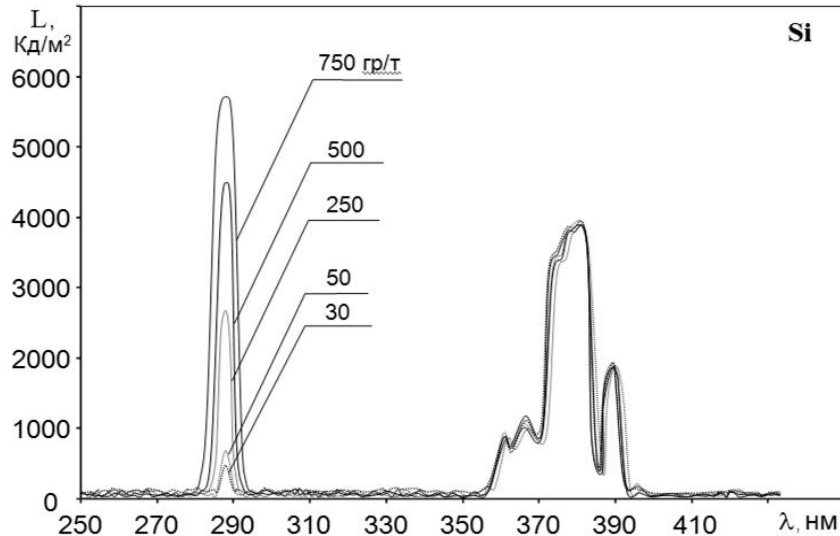


Рис. 2. Результати спалювань оливи із вмістом кремнію (Si) від 30 до 750 гр/т

На рис. 2 наведена залежність для випадку введення у свіжу оливу ТАП-15п кремнію у різних концентраціях (позначено на рисунку). Перший пік  $\lambda = 288$  нм визначає свідчення домішок кремнію у різній концентрації, інший пік, який відповідає діапазону  $\lambda = 355...395$  нм, визначає діапазон довжин хвиль свідчення присадок і зберігається для усіх випадків випробувань оливи ТАП-15п.

Дані спектрограм використовувалися для розрахунку калібрувальних залежностей, які визначають зв'язок яскравості свідчення елементів від їх концентрації, тобто функцію  $\bar{L}(n)$ . При їх побудові кожна олива пропалювалася не менше 10 разів. За результатами спалювань визначалося середнє значення яскравості  $\bar{L}$  (Кд/м<sup>2</sup>):

$$\bar{L} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_i \quad (1)$$

де  $m$ - загальна кількість виконаних випробувань оливи (в нашому випадку  $m \geq 10$ );  $L_i$  - отримані значення яскравості свідчення, що зафіксовані для конкретного включення в  $i$ -му випробуванні, та контролювалося значення стандартного відхилення середнього  $\sigma_{\bar{L}}$  (Кд/м<sup>2</sup>):

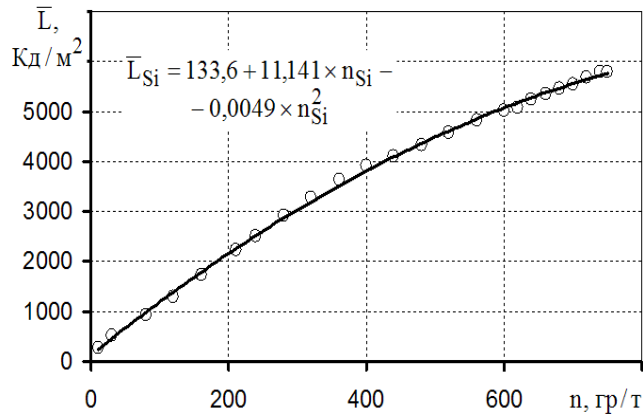
$$\sigma_{\bar{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (L_i - \bar{L})^2}{m(m-1)}}, \quad (2)$$

після чого здійснювалась безпосередньо побудова відповідних калібрувальних залежностей.

На рис. 3 показано приклад такої залежності для встановлення зв'язку між яскравістю свідчення кремнію  $\bar{L}_{Si}$  та його концентрацією  $n_{Si}$  в оливі ТАП-15п.

Використання виразів (1)-(2) та запровадження відповідних заходів щодо контролю достовірності результатів розрахунків дозволило забезпечити не перевищення середньою похибкою апроксимації значення 4,8 - 10% для значень концентрації

елементів до 300 гр/т та 1,0 - 2,5% для значень концентрації елементів вище 400 гр/т, при розрахунку калібрувальних залежностей.



### Результати досліджень

В процесі виконання досліджень використовувалися проби оливи з коробок передач і головних передач, які відбиралися після проведення ТО, тобто через кожні 1000 мото-годин. Відбір проб виконували з прогрітих агрегатів трансмісії шляхом зливу не менше 0,2 л оливи. Місткість маркували з обов'язковим вказанням загального напрацювання трансмісії з моменту введення в експлуатацію.

Перед проведенням аналізу оливи проби ретельно перемішувалися для видалення осаду. Аналіз кожної проби виконували три рази з оцінкою повторюваності результатів. При отриманні розбіжностей більш, ніж 15% збільшували кількість повторів. Концентрацію елементів (гр/т) визначали за середніми величинами отриманих вимірювань за допомогою калібрувальних графіків.

Визначаючи абразивну модель зношування деталей коробок передач можна виділити механізми зношування, які характеризують:

- вплив пилю та бруду на матеріал деталей;
- вплив продуктів зношування сталевих деталей на мідні деталі.

Схематично ці залежності можуть бути представлені схемою, яка наведена на рис.4.



Рис. 4. Механізми, що складають абразивну модель зношування деталей коробок передач

Як бачимо, основними елементами, що характеризують процес поступового зношування деталей є мідь Cu та залізо Fe. Хром та марганець є легуючими елементами сталевих деталей й можуть виступати маркерами процесів зношування деталей (зубчатих муфт, кілець та тіл кочення підшипників) виготовлених, наприклад, із сплавів типу ШХ15СГ, 18ХГТ із підвищеним вмістом цих елементів.

З аналізу абразивної моделі, яка представлена на рисунку, інтерес викликають

наступні залежності:

- між концентраціями елементів Fe(Si);
- між концентраціями елементів Cu(Si, Fe);
- між концентраціями елементів Cu(Fe);
- між концентраціями елементів Cu(Si);
- між концентраціями елементів Cr(Si);
- між концентраціями елементів Mn(Si);
- між концентраціями елементів Cr(Mn).

Перша і четверта залежності визначають безпосередній вплив абразиву типу Si на зношування сталевих та мідних деталей агрегатів трансмісії. Однак остання із них не може бути визначена безпосередньо. Це пояснюється впливом на процес зношування мідних деталей не лише наявності пилу в оливі та його концентрації, а й продуктів зношування сталевих деталей, які по відношенню до мідних також виступають в якості абразиву. В той же час залежність між концентраціями Cu(Si) може бути встановлена з аналізу залежностей два та три, тобто Cu(Si, Fe) – Cu(Fe).

Інші залежності, тобто 5-7 встановлюють вихід легуючих елементів, аналіз концентрацій яких, дозволяє встановити факт зношування груп деталей, виготовлених із одного й того ж сорту сталі – наявність залежності Cr(Mn) (гіпотеза рівномірного розподілу елементів у сплаві), або ж руйнування деталей, що виготовлені із різних сортів сталей – порушення (мутація) залежності між легуючими елементами, або ж, що є більш імовірним, взагалі її відсутність.

Очевидно, що вказані припущення є справедливими для випадку, коли ми можемо чітко ідентифікувати значення параметрів ЕСА для усіх перерахованих елементів. А це, в свою чергу, визначається значеннями концентрацій цих елементів в оливі, а також чутливістю аналізатора до значень цих концентрацій. На рис.5 представлено спектрограми ЕСА оливи для коробки передач тракторів Т-150 а) та МТЗ-80п б). Максимальні значення  $\bar{L}$  на рисунку відповідають напрацюванню 2000 мото-годин.

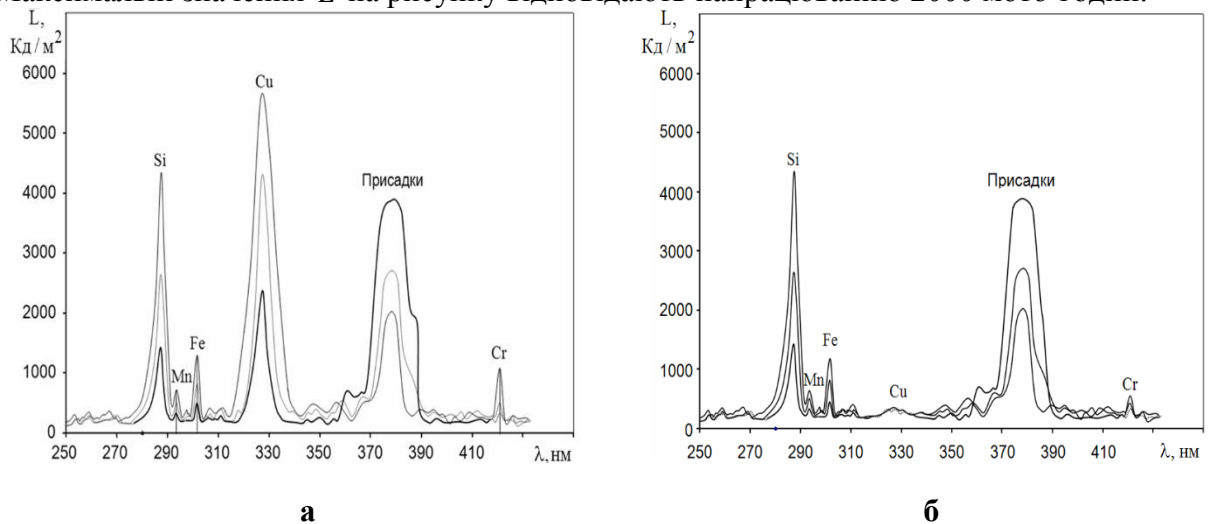


Рис. 5. Результати ЕСА оливи коробок передач:  
а - Т-150;  
б - МТЗ-80п

Із спектрограм бачимо, що не зважаючи на приблизно рівні концентрації Si в оливі коробок передач цих тракторів ( $n_{Si}^{max} \approx 500 \text{ \AA} / \text{d}$ ) вихід деяких елементів є неоднаковим, особливо якщо мати на увазі Cu та Cr. Звичайно це пояснюється конструктивними особливостями коробок передач, що досліджувалися. В той же час максимальні концентрації Fe й в першому, й в другому випадках є також приблизно

однаковими ( $n_{Fe}^{max} \approx 250 \text{ } \ddot{\alpha} / \delta$ ), що свідчить про фактично однакові залежності Fe(Si) для обох коробок передач.

З іншого боку, розглядаючи можливість використання вказаних елементів в якості діагностичних ознак технічного стану деталей коробок передач сільськогосподарської техніки, слід мати на увазі зміну достовірності отримуваних результатів в залежності від рівня концентрації цих елементів. Тобто, є необхідним дослідження функції похибки ідентифікації параметру яскравості в залежності від концентрації елементів  $\delta L(n)$ . Ці функції можуть бути отримані для усіх перерахованих елементів - Fe, Cu, Cr, Mn, Si. На рис.6 представлено їх приклад для Si, Fe та Cu.

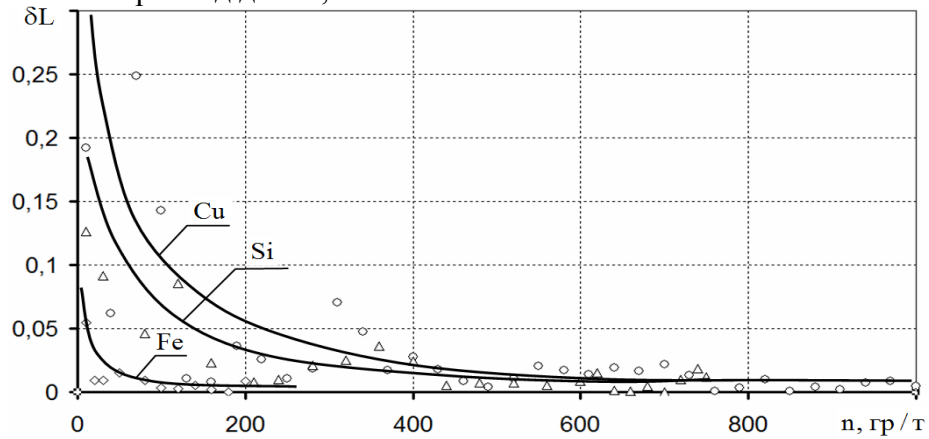
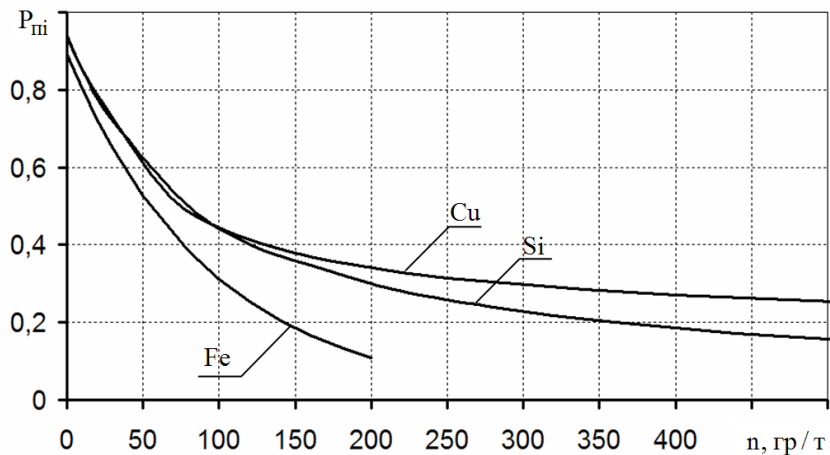


Рис. 6. Вид функції похибок при ідентифікації параметрів ECA

Можна бачити (рис.6), що при низьких концентраціях елементів Cu та Si в оливі, похибки ідентифікації цих елементів достатньо великі й сягають 0,2 – 0,3. В той же час прийнятні значення похибки ідентифікації Fe ми маємо вже при  $n = 25 - 50 \text{ } \ddot{\alpha} / \delta$ . Ці особливості потрібно обов'язково враховувати при формуванні алгоритму прийняття рішення за моделлю, що наведена в роботі [5], а конкретно при формуванні тієї його частини, яка визначає стратегії діагноста. Для цього доречно перейти до функції ймовірностей похибки ідентифікації технічних станів коробок передач та головних коробок за відповідною концентрацією того, або іншого елемента. Приклад функції ймовірностей припущення діагностом похибки при ідентифікації ( $P_{i3}$ ) технічного стану коробок передач та головних коробок за ознакою вмісту кремнію, міді та заліза в оливі представлено на рис.7. Такі ж залежності можуть бути отримані й для легуючих елементів Cr, Mn.



Рису. 7. Зміна ймовірностей похибки ідентифікації технічного стану коробок передач та головних коробок за концентрацією відповідних елементів

## **Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів** Technical service of agriculture, forestry and transport systems

Аналізуючи ці залежності можна бачити, що для малих значень концентрацій Cu та Si (до 200 гр/т) неоднозначність прийняття рішення про технічний стан деталей коробок передач є максимальною й складає близько 40%. В той же час для Fe неоднозначність прийняття рішення при тих же умовах є майже в два рази меншою та складає від 25 до 15%, що пояснюється меншим рівнем похибки ідентифікації даного елемента за результатами ЕСА.

Звичайно ж, повністю неоднозначність прийняття рішення зменшена бути не може. Однак, вона може бути суттєво зменшена за рахунок зменшення функції похибок ідентифікації елементів, що може бути забезпечено щонайменше двома шляхами:

- відповідною організацією експерименту;
- забезпеченням збільшення чутливості обладнання до вмісту елементів в оливі.

Застосування першого підходу потребує збільшення кількості експериментів як для підвищення точності калібрувальних залежностей, так і для підвищення точності ідентифікації елементів за результатами пропалень оливи. Другий же підхід потребує залучення дорогого досвідного обладнання, що також може бути не прийнятним, особливо коли ми маємо справу з дефіцитом коштів на його придбання. Виходом тут може бути раціональне використання можливостей першого та другого підходу, що потребує проведення додаткових досліджень в цьому напрямку.

### **Висновки та перспективи подальших досліджень**

1. В статті розглянуті питання застосування методу ЕСА як найбільш перспективного методу оцінки технічного стану агрегатів технічних систем за вторинними ознаками. Представлені результати проведення досліджень оливи ТАП-15п на модернізованій установці МФС-3 із застосуванням сучасного аналізатору спектра типу QE 65000.

2. Запропонована загальна абразивна модель зношування деталей коробок передач та головних коробок сільськогосподарської техніки, та наведено її теоретичний аналіз, що дозволяє виробити алгоритм дій для побудови її аналітичного аналогу.

3. На основі аналізу особливостей, що мають місце при застосуванні методу ЕСА, встановлено неможливість здійснення діагностування технічного стану систем за виходом елементів, що мають незначні концентрації.

4. На прикладі дослідження коробок передач техніки сільськогосподарського призначення встановлений зв'язок між функціями похибок ідентифікації концентрацій елементів та імовірнісними показниками прийняття рішення діагностом про їх технічний стан. Показано, що отримані результати можуть бути використанні при формуванні статистичної моделі прийняття рішення при виборі діагностичних ознак технічного стану конкретних систем та агрегатів трансмісії.

### **Література**

1. Чирков Ю.А. Результаты проведения межведомственных испытаний рентгено-спектральных анализаторов "Спектран", Призма", "Х-Арт", "БРА-18" / Ю.А. Чирков, М.И. Дасковский // Известия Самарского научного центра РАН т.13, № 4(3), 2011. – С.900-904.

2. Дасковский М.И. Опыт применения различных методов трибодиагностики двигателя ПС-90А в процессе его эксплуатации / М.И. Дасковский // Известия Самарского научного центра РАН т.13, № 4(3), 2011. – С. 1033-35.

3. Евдокимов Ю.И. Организация системы контроля единства измерений в

**Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів**  
Technical service of agriculture, forestry and transport systems

лабораториях, осуществляющих диагностику авиационных двигателей по спектральному анализу масла [Электронный ресурс] / Ю.И. Евдокимов, Ж.Н. Хохлова, В.А. Степанов, А.Г. Сазонов, С.А. Буянов. Режим доступа: [http://www.mtuvtcr.ru/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_details&gid=324](http://www.mtuvtcr.ru/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=324).

4. Отчет по программе межлабораторных сличительных испытаний организаций по техническому обслуживанию и ремонту авиационной техники, осуществляющих спектральный анализ рабочих масел авиационных двигателей. V этап, 2010г.

5. Приймак А.В. Математическая модель диагностирования технического состояния агрегатов трансмиссии методом эмиссионного спектрального анализа / А.В. Приймак, В.Н. Чернявский, Н.В. Циба // Вісник ХНТУ СГ, Вип. 124. – С. 164-170.

6. Власов Ю.А. Исследование процессов изнашивания редукторов мотор-колес автосамосвалов БЕЛАЗ по параметрам работающего масла [Электронный ресурс] / Ю.А.Власов, Н.Т. Тищенко // Горные машины и оборудование. – С. 34-38. Режим доступа до журн.: <http://ko.kuzstu.ru/herald/index.php?page=abc&author=%C2%EB%E0%F1%EE%E2%20%DE.%C0>.

7. Рекомендации по внедрению диагностической системы управления состоянием дизелей тепловозов и дизель-тепловозов по результатам анализа масла. Введены 23.10.2009г. – 32с.

8. Сиротин Н.Н. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей./ Н.Н.Сиротин, Ю.М.Коровин – М.: Машиностроение, 1979. – 279с.

9. Степанов В.А. Диагностика технического состояния узлов трения трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле / В.А. Степанов. – Рыбинск: НПО “Сатурн”, 2002. – 232 с.



**V.Voytov, A. Priymak, V. Cherniavskiy, N. Tsiba. Assessment of technical condition of transmission units using the method of emission spectral analysis of oils**

The article considers issues related with usage of oil emission spectral analysis method for assessment transmission parts technical state. The general abrasive model of details tearing was offered. The relations between errors functions of concentration of elements and probabilistic parameters of decisions for their technical state was established.

**Keywords:** control of the technical state, emission spectrology of butter

**References**

1. Chirkov Ju.A. Rezul'taty provedeniya mezhvedomstvennyh ispytaniy rengen-spektral'nyh analizatorov "Spektran", "Prizma", "H-Art", "BRA-18" / Ju.A. Chirkov, M.I. Daskovskij // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN t.13, № 4(3)*, 2011. – S.900-904.
2. Daskovskij M.I. Opyt primeneniya razlichnyh metodov tribodiagnostiki dvigatelja PS-90A v processe ego jekspluatacii / M.I. Daskovskij // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN t.13, № 4(3)*, 2011. – S. 1033-35.
3. Evdokimov Ju.I. Organizacija sistemy kontrolja edinstva izmerenij v laboratorijah, osushhestvljajushhh diagnostiku aviacionnyh dvigatelej po spektral'nomu analizu masla [Elektronnij resurs] / Ju.I. Evdokimov, Zh.N. Hohlova, V.A. Stepanov, A.G. Sazonov, S.A. Bujanov. Rezhim dostupu: [http://www.mtuvtcr.ru/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_details&gid=324](http://www.mtuvtcr.ru/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=324).
4. Otchet po programme mezhlaboratornyh slichitel'nyh ispytaniy organizacij po tehničeskomu obsluzhivaniju i remontu aviacionnoj tehniki, osushhestvljajushhh spektral'nyj analiz rabochnih masel aviacionnyh dvigatelej. V jetap, 2010g.
5. Prijmak A.V. Matematicheskaja model' diagnostirovanija tehničeskogo sostojanija agregatov transmissii metodom jemissionnogo spektral'nogo analiza / A.V. Prijmak, V.N. Chernjavskij, N.V. Ciba // *Visnik HNTU SG, Vip. 124*. – S. 164-170.
6. Vlasov Ju.A. Issledovanie processov iznashivaniya reduktorov motor-koles avtosamosvalov BeLAZ po parametram rabotajushhego masla [Elektronnij resurs] / Ju.A.Vlasov, N.T. Tishhenko // *Gornye mashiny i oborudovanie*. – S. 34-38. Rezhim dostupu do zhurn.: <http://ko.kuzstu.ru/herald/index.php?page=abc&author=%C2%EB%E0%F1%EE%E2%20%DE.%C0>.
7. Rekomendacii po vnedreniju diagnostičeskoy sistemy upravlenija sostojaniem dizelej teplovozov i dizel'-teplovozov po rezul'tatam analiza masla. Vvedeny 23.10.2009g. – 32s.
8. Sirotin N.N. Tehničeskaja diagnostika aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej./ N.N.Sirotin, Ju.M.Korovin – M.: Mashinostroenie, 1979. – 279s.
9. Stepanov V.A. Diagnostika tehničeskogo sostojanija uzlov trenija transmissii gazoturbinnnyh dvigatelej po parametram produktov iznosa v masle / V.A. Stepanov. – Rybinsk: NPO "Saturn", 2002. – 232 s.