

ADSORBER COMPOZIT - O SOLUȚIE PENTRU REGENERAREA ULEIULUI UZAT DIN ECHIPAMENTELE ELECTRICE

Maria-Cristina NIȚU¹, Ancuța-Mihaela ACIU², Aurelia Iuliana SCORNEA³

¹Laborator Cercetare-Dezvoltare Eficiență Energetică și Calitatea Energiei

²Laborator Cercetare-Dezvoltare Echipamente Electrotehnice,
Electromecanice și Monitorizari

³Laborator Încercări asupra Materialelor, Produselor și Subansamblurilor Electrice și
Electronice, Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare și Încercări pentru Electrotehnica -
ICMET Craiova

cristinamarianitu@yahoo.com¹, ancutu13@yahoo.com², scornea@icmet.ro³

Rezumat. Uleiurile izolante minerale utilizate în echipamentele electrice, sunt scumpe, iar materia primă din care sunt extrase este o sursă epuizabilă, așa că, din punct de vedere economic și al mediului, este mai bine ca acestea să fie regenerate decât înlocuite. Această lucrare prezintă o primă fază din proiectul demarat de autori privind obținerea unei soluții optime pentru regenerarea uleiurilor uzate din echipamentele electrice aducând parametrii acestora la parametrii uleiurilor de tip B din standardul IEC 60296:2020. Lucrare descrie etapele procesului de obținere a unui adsorber compozit ca soluție inovatoare, economică și ecologică pentru regenerarea uleiului uzat din echipamentele electrice. Rezultatele obținute la testarea uleiului uzat, atât înainte, cât și după procesul de regenerare, arată îmbunătățirea proprietăților uleiului, în conformitate cu standardele actuale.

1. INTRODUCERE

Uleiurile izolatoare minerale sunt utilizate în multe aplicații industriale, ele având un rol important în ceea ce privește fiabilitatea și durata de viață a echipamentelor electrice. Materiile prime, cum ar fi țițeiul, din care derivă aceste uleiuri sunt resurse epuizabile și trebuie utilizate economic. Astfel, din punct de vedere economic și al mediului, este mai bine ca acestea să fie regenerate decât înlocuite.

Acest lucru este în concordanță cu Directiva (UE) 2018/851 a Parlamentului European și a Consiliului, din 30 mai 2018 de modificare a Directivei 2008/98/CE privind deșeurile: „Colectarea separată a uleiurilor uzate și prevenirea amestecării lor cu alte tipuri de deșeuri sau substanțe, sunt esențiale pentru a asigura faptul că tratarea lor oferă cel mai bun rezultat global în privința mediului. La tratarea uleiurilor uzate, ar trebui să se acorde prioritate regenerării sau, alternativ, altor operațiuni de reciclare care au un rezultat global echivalent sau mai bun în privința mediului decât regenerarea. În cursul acestei examinări, ar trebui să se acorde atenție opțiunilor de tratare privind regenerarea uleiurilor uzate, precum și calității și utilizării finale a produselor regenerate și reciclate” [1-2].

De asemenea, International Electrotechnical Commission (IEC) a emis cea de-a 5-a ediție a standardului IEC 60296:2020 intitulată: „Fluide pentru aplicații electrotehnice – Uleiuri minerale izolante pentru echipamente electrice” [3], reprezentând pentru prima dată un standard bazat pe performanța uleiului mineral izolator și nu pe origine. Acesta conține specificații și metode de încercare pentru uleiurile minerale izolante nefolosite și reciclate.

În România, gestionarea uleiurilor uzate este reglementată strict prin legislație, care prioritizează regenerarea. Procesul de regenerare/reciclare a uleiurilor electroizolante uzate este un proces tehnic esențial pentru menținerea performanței și siguranței echipamentelor

electrice. Aceste uleiuri îndeplinesc funcții critice de izolare electrică și în cazul transformatoarelor și de răcire.

În timpul funcționării echipamentele electrice imersate în ulei îmbătrânesc, iar materialele lor electroizolante suferă un proces de degradare lentă, dar constantă. Degradarea progresivă și îmbătrânirea prematură rezultă din diferite fenomene (electrice, termice, mecanice, chimice, etc.) ce au loc în timpul funcționării echipamentelor electrice. Astfel, proprietățile dielectrice și electrotermice ale uleiului se reduc ducând în final la defectarea echipamentelor electrice (sârșitul vieții acestora) cu riscuri majore pentru stațiile electrice și chiar pentru mediu. Pe de altă parte, înlocuirea uleiului mineral degradat/uzat pentru a evita defecțiunile este, din punct de vedere ecologic, este problematică în special dacă nu i se acordă atenția cuvenită și nu este efectuată în mod corespunzător.

La ora actuală, preocupările din ce în ce mai mari pentru mediu legate de poluarea cu ulei mineral i-a determinat pe cercetătorii din întreaga lume să găsească materiale și tehnici care să ducă la regenerarea/recuperarea uleiurilor minerale uzate/îmbătrânite la nivelul uleiurilor minerale noi pentru a putea fi reutilizate. Astfel, funcționarea durabilă a echipamentelor electrice să se realizeze prin echilibrarea riscului potențial de mediu cu soluții ieftine ce pot duce la prelungirea duratei de viață a izolației acestora și nu în ultimul rând la reducerea impactului asupra mediului [4-7] .

Având în vedere că majoritatea produselor de degradare sunt solubile în ulei, apariția acestora, pe măsură ce echipamentele electrice îmbătrânesc, se reflectă în modificarea valorilor parametrilor de stare ai uleiului precum: culoarea, rigiditatea dielectrică, factorul de pierderi dielectrice ($\tan \delta$) și rezistivitatea, conținutul de apă, tensiunea interfacială, indicele de aciditate, etc.

Regenerarea uleiului electroizolant din echipamentele electrice este un instrument important de mentenanță preventivă și reprezintă un rol esențial în conservarea mediului și a resurselor primare și se realizează, în general, printr-un proces de adsorbție.

Procedurile de regenerare a uleiurilor din transformatoare s-au bazat pe folosirea de adsorberi naturali care au dus la o îmbunătățire a proprietăților fizico-chimice ale uleiului, dar aceștia au prezentat o eliminare a apei din izolația solidă și o adsorbție a elementelor polare scăzută și nu în ultimul rând, după utilizare ne mai putând fi reactivați duc la cantități semnificative de deșeuri. Astfel, cercetătorii s-au axat pe alte materiale și pe adsorbanți sintetici care să îndeplinească cerințele de obținere a unui ulei regenerat cât mai aproape de caracteristicile uleiului nou cu costuri reduse [8-13]. Astfel, cele mai utilizate au fost pământul lui Fuller, bauxita activată și bentonita activată, folosirea acestora s-a dovedit a nu fi ecologică, constrângerile privind protecția mediului, au dus la utilizarea de amestecuri de adsorberi și de site moleculare zeolitice [14-17].

Această lucrare are ca scop evidențierea importanței tratării/ revitalizării uleiurilor uzate din echipamentele electrice, prin realizarea de analize experimentale asupra performanțelor individuale ale unor materiale adsorbante și a adsorberilor compoziți rezultați din acestea.

Lucrarea se structurează astfel: în capitolul 2 sunt prezentate materialele și echipamentele utilizate; metoda de tratare și rezultatele obținute sunt prezentate în capitolul 3, iar capitolul 4 conține concluziile și preocupările viitoare.

2. MATERIALE ȘI ECHIPAMENTE UTILIZATE

Pentru regenerarea uleiurilor uzate din echipamente electrice, autorii doresc utilizarea unor materiale adsorbante, care să îmbunătățească proprietățile acestor uleiuri, la nivelurile uleiurilor tip B din standardul IEC 60296:2020 [3] și totodată să poată fi reactivate după utilizare.

În vederea obținerii adsorbantului compozit, în primul rând au fost aleși trei adsorberi (site moleculare), un adsorber de natură ceramică (notat A1) și doi de natură zeolitică (notați A2 și respectiv A3). În Fig. 1 sunt prezentați cei trei adsorberi aleși și care vor fi utilizați în experimente.

În prima etapă, adsorberi aleși au fost utilizați pentru a studia capacitatea fiecăruia de a îmbunătăți proprietățile fizico-chimice a unor uleiuri cu grad diferit de degradare. Apoi, în urma rezultatelor obținute cei trei adsorberi au fost amestecați în proporții diferite obținându-se o serie de adsorberi compoziți (notați cu C1 ÷ C7), ce au fost de asemenea, utilizați pentru a determina capacitatea fiecăruia de a îmbunătăți proprietățile fizico-chimice a unui ulei uzat pentru a stabili astfel adsorberul compozit care poate regenera uleiul uzat la parametrii unui ulei conform uleiurilor tip B din standardul IEC 60296:2020.



Fig. 1 – Materialul adsorbant: a) adsorberul A2, b) adsorberul A1 și c) adsorberul A3

În exploatare se găsesc mai multe tipuri de uleiuri în funcție de tipul de hidrocarbură care este dominant respectiv uleiuri parafinice și naftelnice. Acestea la rândul lor pot fi aditivate sau neaditivate. Uleiurile aditivate și neaditivate se comportă în moduri diferite în timpul funcționării echipamentului. Acest lucru se datorează faptului că stabilitatea inerentă la oxidare a uleiului depinde foarte mult de gradul de rafinare și chimia oxidării uleiului.

Ținând cont de faptul că natura uleiului electroizolant joacă un rol important în procesul de regenerare/tratare a uleiului uzat, am ales pentru primele experimentări (etapa de studiu a celor trei adsorberi) mai multe tipuri de ulei electroizolant precum uleiuri parafinice, naftelnice și de asemenea aditivate și neaditivate în stări de degradare diferite. Acestea au fost prelevate de la patru transformatoare și două întreruptoare cu vechime în funcționare cuprinsă între 25 și 39 de ani.

Standardele și aparatura utilizată pentru determinarea principalilor parametri de calitate a uleiurilor atât în faza inițială cât și în faza finală a procesului de tratare cu cei trei adsorberi aleși și cu adsorberii compoziți obținuți sunt evidențiate în Tabelul 1.

Tabel 1

Standardele și aparatura utilizată pentru determinarea parametri de calitate a uleiului

Nr. crt.	Parametru de calitate a uleiului	Standard	Aparatura utilizată
1	Determinarea tensiunii de străpungere /rigidității dielectrice	IEC 60156:2018	Aparat tip MEGGER OTS 100AF/2 și termohigrometru digital, tip HD 100, fabricație KIMO Franța
2	Determinarea tangentei unghiului de pierderi dielectrice la 90°C și 50 HZ	IEC 60247:2004	Trusă tip DTLC, seria 1201713012, fabricație BAUR Austria și termohigrometru digital, tip HD 100, fabricație KIMO Franța
3	Determinarea conținutului de apă la 20°C	IEC 60814:2002	Titratore coulometric, tip Karl Fischer CA 21, fabricație MITSUBISHI Japonia și termohigrometru digital, tip HD 100, fabricație KIMO Franța

Nr. crt.	Parametru de calitate a uleiului	Standard	Aparatura utilizată
4	Determinarea tensiunii interfaciale	IEC 62961:2019	Tensiometru SIGMA 702ET, seria 72067/2007, cu inel tensiometric Du Noüy T 106 D-002 și termohigrometru digital, tip HD 100, fabricație KIMO Franța
5	Determinarea acidității (indice de neutralizare)	IEC 62021-1:2004	Biurete TITRETTE de 25 ml și termohigrometru digital, tip HD 100, fabricație KIMO Franța

* Echipamentele specificate fac parte din laboratorul de materiale al ICMET Craiova

3. METODĂ ȘI REZULTATE

Procedura de tratare utilizată este o combinație între metoda de contact, percolare gravitațională și recirculare, iar etapele acestei proceduri, aplicate fiecărui tip de ulei uzat prelevat sunt următoarele:

- montarea, pe suport de susținere, a unei pâlnii de separare din sticlă, prevăzută cu robinet și dop de etanșare;
- introducerea în pâlnie a 800g de adsorbant;
- introducerea în pâlnie peste adsorbant a unei cantități de un litru din uleiul uzat ce urmează a fi tratat;
- realizarea pe o perioadă de o săptămână a ciclurilor de recircularea a uleiului din fiecare pâlnie din 24 în 24 de ore;
- prelevarea de probe de ulei și determinarea valorilor parametrilor reprezentativi ai uleiului după aplicarea acestui tratament.

3.1. Etapa 1 - analiza uleiurilor cu cei trei adsorberi aleși

Pentru a observa evoluția caracteristicilor fizico - chimice a mostrelor de ulei uzat, alese pentru a fi supuse procedurii de tratare/revitalizare cu cei trei adsorberi, au fost determinate valorile parametrilor de calitate reprezentativi ai fiecărui ulei (înainte și după procesul de tratare/revitalizare). În baza rezultatelor obținute, a fost determinată starea uleiurilor în funcție de indicele de calitate al uleiului.

Indicele de calitate al uleiului, indice denumit și Myers Index Number sau Oil Quality Index (OQIN), este dat de raportul dintre tensiunea interfacială și indicele de neutralizare, ecuația (1). Valoarea acestui indice este folosită ca un indicator în diagnosticarea stării uleiului. Astfel, uleiul izolator poate fi clasificat în șapte categorii distincte (Tabelul 2), extinzând potențialul programelor (aplicațiilor) de monitorizarea a uleiului atât offline, cât și online [18].

$$OQIN = \frac{IFT}{NN}; \quad 1500 = \frac{45}{0,03} \text{ (tipic ulei nou)} \quad (1)$$

Tabelul 2

Clasificarea stării uleiului izolator în funcție de OQIN

Nr. crt.	Domeniul valoric OQIN	Clasa uleiului	Starea uleiului
1	1500 până la 1000	A	Ulei bun, funcțiile uleiului sunt eficiente
2	600 până la 271	B	Funcțiile uleiului sunt bune, dar există posibilitatea de formare de nămol
3	245 până la 160	C	Ulei marginal, nu oferă o protecție adecvată la răcire
4	150 până la 45	D	Ulei uzat nămol deja depus

Nr. crt.	Domeniul valoric OQIN	Clasa uleiului	Starea uleiului
5	44 până la 22	E	Ulei foarte uzat (potrivit pentru recondiționare), eficiența redusă de răcire cu temperaturi de funcționare mai ridicate
6	21 până la 6	F	Ulei extrem de uzat (adecvat pentru regenerare), eficiența redusă de răcire cu temperaturi de funcționare mai ridicate
7	sub 6	G	Ulei în stare dezastruoasă

În cele ce urmează sunt prezentate procedura de tratare/revitalizare și testare pentru două uleiuri uzate, au fost folosite următoarele notații:

- **Up** - ulei parafinic neaditivat prelevat dintr-un întreruptor (tip TR30).
- **Un** - ulei naftelnic aditivat prelevat dintr-un transformator (tip NYTRO Lyra X),
- **Starea I** - starea inițială în care cele 2 tipuri de ulei **Up** și **Un** se află în faza dinaintea procesului de tratare. În această stare, probele de ulei au fost notate cu **I_Up** și respectiv **I_Un**;
- **Starea T1** - starea în care cele 2 tipuri de ulei **Up** și **Un** se află în faza de după procesul de tratare cu adsorberul **A1**. În această stare, probele de ulei au fost notate cu **T1_Up** și respectiv **T1_Un**;
- **Starea T2** - starea în care cele 2 tipuri de ulei **Up** și **Un** se află în faza de după procesul de tratare cu adsorberul **A2**. În această stare, probele de ulei au fost notate cu **T2_Up** și respectiv **T2_Un**;
- **Starea T3** - starea în care cele 2 tipuri de ulei **Up** și **Un** se află în faza de după procesul de tratare cu adsorberul **A3**. În această stare, probele de ulei au fost notate cu **T3_Up** și respectiv **T3_Un**.

Valorile parametrilor de calitate reprezentativi ai fiecărui tip de ulei înainte și după tratare sunt prezentate în Tabelele 3 și 5, iar variația acestor parametri în Fig. 2 și 3. Valoarea OQIN, starea și respectiv clasa celor două tipuri de ulei sunt prezentate în Tabelele 4 și 5, iar evoluția acestora în Fig. 4.

Tabelul 3
Parametri de calitate a celor 2 tipuri de ulei aflate în **Starea I**

Nr. crt.	Parametrul măsurat	Ulei I-Up	Ulei I-Un
1	Tensiune de străpungere [kV]	35,5	22,4
2	Tan δ 90°C, la 50 Hz	0,0281	0,0054
3	Conținutul de apă la 20°C [ppm]	35,32	36,34
4	Tensiune interfacială [dyne/cm]	18,54	20,05
5	Indicele de neutralizare [mgKOH/g]	0,314	0,342

Tabelul 4
Starea, respectiv clasa celor 2 tipuri de ulei aflate în **Starea I**

Ulei	Valoare OQIN	Starea uleiului / Clasa uleiului
I-Up	59,04	Ulei uzat nămol deja depus / Clasa D
I-Un	58,62	Ulei uzat nămol deja depus / Clasa D

Tabelul 5
Parametri de calitate a celor 2 tipuri de ulei aflate în Stările T1, T2 și T3

Nr. crt.	Parametru măsurat	Adsorbant A1		Adsorbant A2		Adsorbant A3		Limite conform IEC 60296
		Ulei T1-Up	Ulei T1-Un	Ulei T2-Up	Ulei T2-Un	Ulei T3-Up	Ulei T3-Un	
1	Tensiune de străpungere [kV]	49,3/197,2	72,6/290,4	56,3/225,2	78,9/315,6	48,4/193,6	59,8/239,2	min. 30 kV/70 kV
2	Tan δ 90°C, la 50 Hz	0,0013	0,0023	0,0018	0,0015	0,0011	0,0069	max. 0,005
3	Conținutul de apă la 20°C [ppm]	19,47	14,32	8,21	2,84	8,16	7,79	max. 30/40
4	Tensiune interfacială [dyne/cm]	47,56	48,88	61,91	44,13	46,23	48,87	min. 40
5	Indicele de neutralizare [mgKOH/g]	0,022	0,364	0,039	0,067	0,028	0,056	max. 0,01

Tabelul 6
Starea, respectiv clasa celor 2 tipuri de ulei aflate în Stările T1, T2 și T3

Ulei	Valoare OQIN	Starea uleiului / Clasa uleiului
<i>Ulei parafinic neaditivat din întreruptor (tip TR30)</i>		
T1-Up	2161,81	Ulei bun, funcțiile uleiului sunt eficiente / Clasa A
T2-Up	1587,43	Ulei bun, funcțiile uleiului sunt eficiente / Clasa A
T3-Up	1651,07	Ulei bun, funcțiile uleiului sunt eficiente / Clasa A
<i>Ulei naftelnic aditivat din transformator (tip NYTRO Lyra X)</i>		
T1-Un	134,28	Ulei uzat nămol deja depus / Clasa D
T2-Un	658,65	Ulei bun, funcțiile uleiului sunt eficiente / Clasa A
T3-Un	872,67	Ulei bun, funcțiile uleiului sunt eficiente / Clasa A

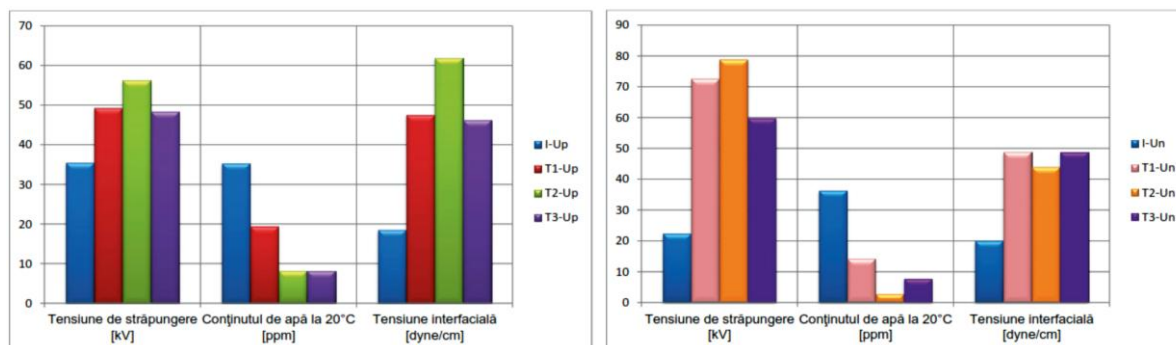


Fig. 2 – Variația tensiunii de străpungere, conținutului de apă și a tensiunii interfaciale a uleiului parafinic Up (stânga) și a uleiului naftelnic Un (dreapta).

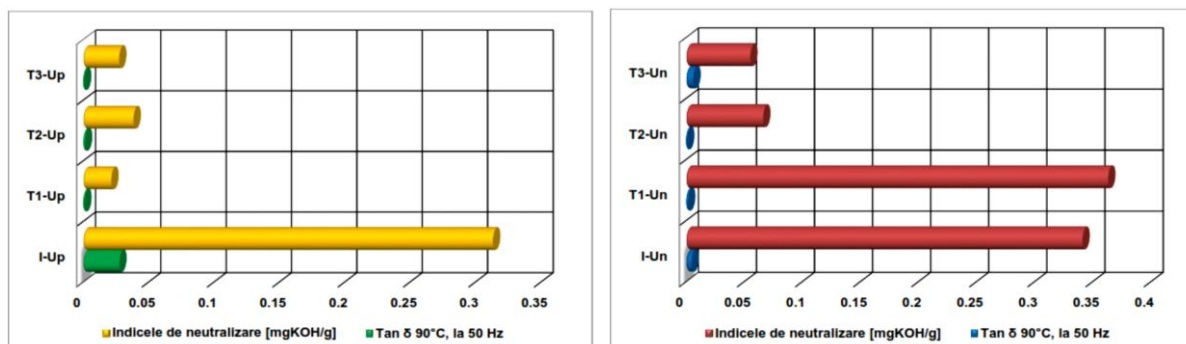


Fig. 3 – Variația indicelui de neutralizare și a Tan δ la 90°C pentru uleiul parafinic Up (stânga) și uleiul naftelnic Un (dreapta).

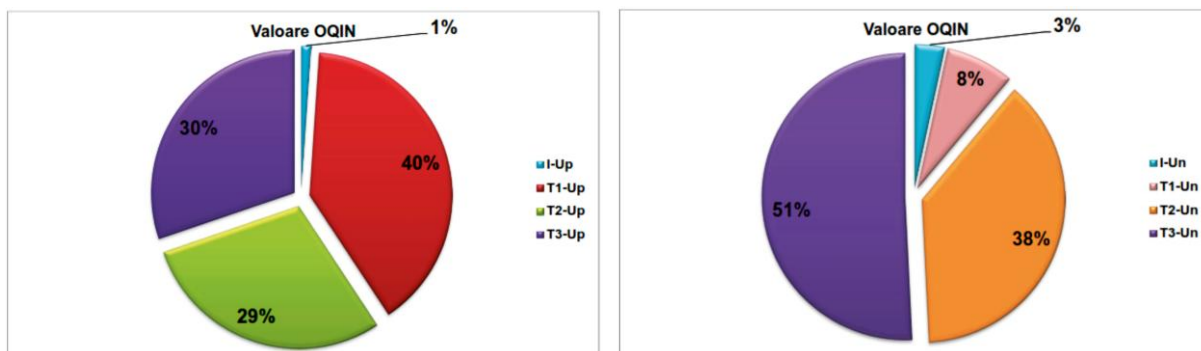


Fig. 4 – Variația indicelui de calitate a celor două uleiurii: parafinic Up (stânga) și naftelnic Un (dreapta).

Probele celor două tipuri de ulei analizate în această etapă, înainte și după aplicarea procesului de tratare cu cei 3 adsorberi sunt prezentate în Fig. 5.

Rezultatele obținute în urma procesului de tratare/revitalizare cu cei trei adsorberi subliniază faptul că fiecare adsorbant aduce un aport semnificativ în îmbunătățirea parametrilor calitativi ai uleiurilor uzate indiferent dacă sunt parafinice sau naftelnice, aditivate sau neaditivate.

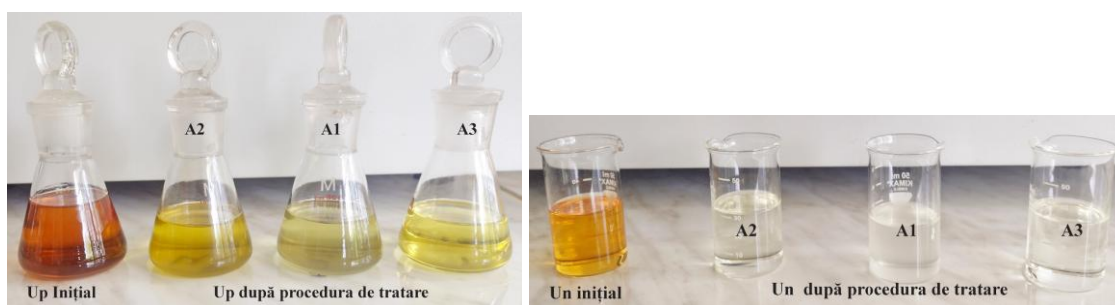


Fig. 5 – Eșantioanele celor două tipuri de uleiuri înainte și după tratarea cu cei trei adsorberi. Pentru uleiul parafinic Up (stânga) și uleiul naftelnic Un (dreapta).

3.2. Etapa 2 - analiza uleiului cu adsorberi compoziți

În urma rezultatelor obținute în etapa 1, în această etapă pentru determinarea unei variante de adsorbant compozit optim, cu care să se poată revitaliza/recupera uleiul mineral uzat/îmbătrânit din echipamentele electrice la nivelul unui ulei mineral nou cu proprietăți în conformitate cu uleiul de tip B din standardul IEC/CEI 60296:2020. Au fost realizate șapte variante structurale de adsorber compozit, ce constau în cantități procentuale diferite din cei trei adsorbanti (A1 ÷ A3) ce au fost menționați în capitolul 2. Cele șapte variante structurale de adsorber compozit au fost notate cu C1, C2, ..., C7.

În această etapă, uleiul folosit în experimentări, pentru a vedea eficacitatea adsorberului compozit, este un ulei parafinic neaditivat (tip TR30) prelevat din cuva camerei de stingere a întreruptorului tip IO-B; 1250 A; 17,5 kV, cu vechime în funcționare de 35 de ani și a fost notat Up.

Pentru o interpretare ușoară a rezultatelor, starea uleiului și probele de ulei testate au fost marcate astfel:

- **Starea I**, este notația pentru starea inițială în care uleiul utilizat se află în faza dinaintea procesului de tratare. În această stare, proba de ulei a fost notată cu **I-Up**;

- **Starea F**, este notația pentru starea finală a uleiului, adică după tratarea cu adsorbentul compozit. Cum au fost utilizați șapte adsorberi compoziți (C1 ÷ C7), probele de ulei în această stare au fost notate: **Up-Fv1 ÷ Up-Fv7**.

În această lucrare sunt prezentate rezultatele obținute utilizând două variante structurale de adsorber compozit, aceste au înregistrat rezultatele cele mai apropiate de valorile din standard. Acestea sunt varianta 2 și 4, corespunzătoare variantelor structurale de adsorber compozit C2 și C4. Valorile parametrilor de calitate reprezentativi ai uleiului înainte și după tratarea cu cele două variante structurale de adsorber compozit C2 și C4 sunt prezentate în Tabelul 7, iar variația acestor parametri în figura 6. Valoarea OQIN, starea și respectiv clasa uleiului înainte și după tratarea cu C2 și C4 sunt prezentate în Tabelul 8, iar evoluția acestora în Fig.7.

Tabelul 7

Parametri de calitate a uleiului înainte și după tratarea cu variantele structurale de adsorber compozit C2 și C4

Nr. crt.	Parametrul măsurat	Probe ulei			Limite conform IEC 60296
		I-Up	Up-Fv2	Up-Fv4	
1	Tensiune de străpungere [kV]	35,5/ 142	59,2/ 236,8	65/ 260	min. 30 kV/ 70 kV
2	Tan δ 90°C, la 50 Hz	0,0281	0,0038	0,0037	max.0,005
3	Conținutul de apă la 20°C [ppm]	35,32	10,11	12,32	max. 30/40
4	Tensiune interfacială [dyne/cm]	18,54	35,78	39,97	min. 40
5	Indicele de neutralizare [mgKOH/g]	0,314	0,196	0,131	max. 0,01

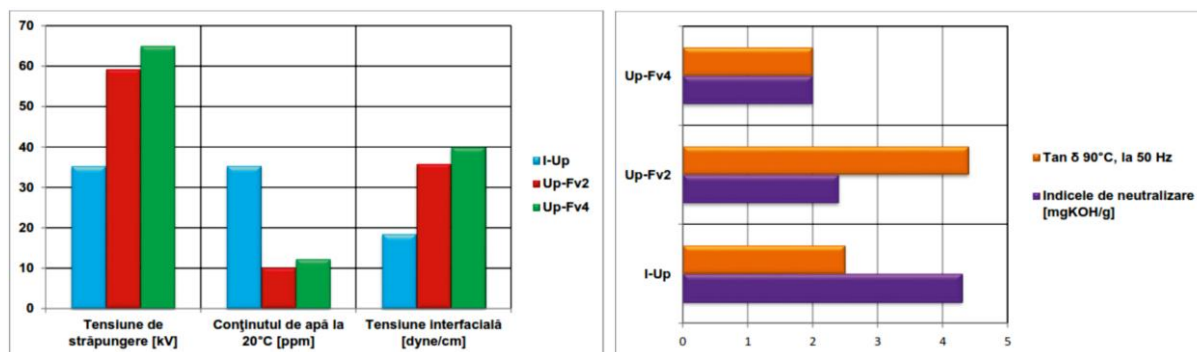


Fig. 6 – Variația parametrilor de calitate a uleiului înainte și după tratarea cu variantele structurale de adsorber compozit C2 și C4/

Tabelul 8

Starea, respectiv clasa uleiului înainte și după tratarea cu cele două variante structurale de adsorber compozit C2 și C4

Ulei	Valoare OQIN	Starea uleiului / Clasa uleiului
I-Up	59,04	Ulei uzat nămol deja depus / Clasa D
Up-Fv2	182,56	Ulei marginal, nu oferă o protecție adecvată la răcire / Clasa C
Up-Fv4	305,14	Funcțiile uleiului sunt bune, dar există posibilitatea de formare de nămol / Clasa B

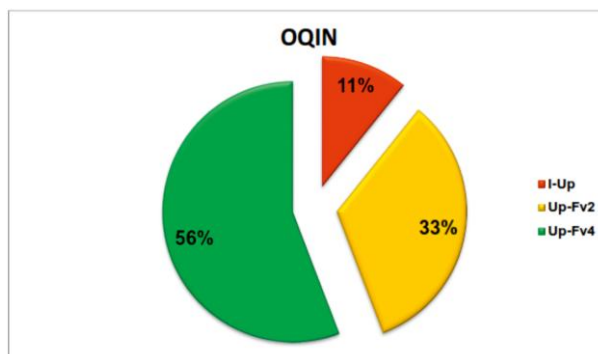


Fig. 7 – Variația indicelui de calitate a uleiului înainte și după tratarea cu cele două variante structurale de adsorber compozit C2 și C4.

Probele uleiului analizate în această etapă, înainte și după aplicarea procesului de tratare cu cele două variante structurale de adsorber compozit sunt prezentate în Fig. 8.



Fig. 8 – Probele de ulei înainte și după procedura de tratare cu cele două variante structurale de adsorber compozit C2 (stânga) și C4 (dreapta).

4. CONCLUZII

Având în vedere că uleiurile minerale utilizate în echipamentele electrice sunt scumpe, iar materia primă (petrolul) este o sursă epuizabilă, au fost impuse anumite reglementări privind regenerarea/recuperarea acestora pentru a putea fi refolosite având astfel un impact major în protecția mediului și conservarea resurselor naturale. Prin urmare, este necesar să se utilizeze proceduri de regenerare/recuperare a uleiurilor uzate/îmbătrânite pentru a recăștiga proprietățile dielectrice ale acestora. Au fost dezvoltate proceduri care să utilizeze materiale adsorbante sintetice, ce pot să elimine compuși polari din ulei, permițând aducerea uleiului în parametrii cât mai apropiați de valorile inițiale, dar să permită și reactivarea/reutilizarea lor de mai multe ori.

Din punct de vedere economic și tehnic revitalizarea în comparație cu înlocuirea uleiului prezintă avantaje considerabile. Aplicarea unui management de mentenanță permit prelungirea duratei de viață a echipamentelor electrice precum și fiabilitatea funcționării acestora în rețeaua energetică.

Prin aplicarea proceselor de revitalizare pe bază de adsorbție, se asigură în primul rând regenerarea/tratarea/revitalizarea uleiului, dar și protecția mediului și a oamenilor, deoarece adsorberii sintetici sunt reactivabili (nu sunt o sursă de poluare).

Cum preocupările noastre coincid cu cele ale altor cercetători ce s-au axat pe materiale și adsorbanți sintetici care să îndeplinească cerințele de obținere a unui ulei

regenerat cât mai aproape de caracteristicile uleiului nou cu costuri reduse, în cadrul acestei lucrări au fost prezentate o serie de analize experimentale asupra performanțelor individuale ale unor materiale adsorbante și a unor adsorberi compoziți în dorința de a obține adsorberul compozit optim ce va fi utilizat în procesul de revitalizare/tratare a uleiului uzat din echipamentele electrice.

În urma experimentelor efectuate, atât adsorberii sintetici utilizați cât și variantele structurale de adsorber compozit obținute, au adus un aport semnificativ în îmbunătățirea parametrilor de calitate reprezentativi și a indicelui de calitate a uleiurilor uzate/îmbătrânite, iar valorile obținute se încadrează în valorile impuse de standard mai puțin indicele de aciditate.

Cercetările vor continua cu utilizarea variantelor de adsorberi compoziți pe uleiuri parafinice și naftelnice aditivat în diferite grade de degradare/îmbătrânire, determinarea și a altor parametri precum vâscozitatea, turbiditatea, punctului de aprindere, punctului de rouă, stabilitatea la oxidare atât a uleiurilor deja tratate cât și a celor ce se vor trata. Toate acestea se vor face în vederea obținerii soluției (adsorberului compozit) cu cele mai bune rezultate și testarea acestuia într-o instalație de tratare și compararea rezultatelor din teren cu cele obținute în laborator.

CONFIRMARE

Această lucrare a fost realizată prin intermediul Programului NUCLEU din cadrul Planului Național de Cercetare Dezvoltare și Inovare 2022-2027, realizat cu sprijinul MCID, proiect nr. PN 23 33 02 03.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLIOGRAFIE

1. Directiva (UE) 2018/851 a Parlamentului European, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ro/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>.
2. Ordonanța de Urgență nr. 92 din 19 august 2021 <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocument/245846>
3. CEI/IEC 60296:2020 - Fluids for electrotechnical applications - Mineral insulating oils for electrical equipment, Edition 5, pages 82, 2020.
4. CIGRÉ Brochure 413 - Insulating Oil Reclamation and Dechlorination, W.G. D1.01 (TF 12), April 2010.
5. CIGRÉ Brochure 887 - Life extension of oil filled transformers and shunt reactors, W.G. A2.55, December 2022.
6. CEI/IEC 60422:2013 - Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance,, Edition 4, pages 93, 2013.
7. IEEE Std C57.637-2015 - Guide for the Reclamation of Mineral Insulating Oil and Criteria for Its Use, 26 October 2015.
8. L. Safiddine, A.H.Z. Zafour, I. Fofana, A. Skender, F. Guerbas, A. Boucherit, *Transformer oil reclamation by combining several strategies enhanced by the use of four adsorbents*, IET Generation, Transmission & Distribution, pp.1-9 , March 2017.
9. A.I. Hafez, A.M. El Deeb, M.H. El Behairy, E.M. Khalil, M.S.A. El Fattah, *Study on the treatment of high voltage used transformer oil by using natural material*, IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC), **12**, 10 Ser. I, pp. 19-36 October. 2019.
10. Q. Liu, P. Dou, C. Li, Y. Shi and B. Shen, *Regeneration of aged transformer oil by adsorption using attapulgate-chitosan composite*, Mater. Express, **12**, pp. 155-160, 2022.
11. D. Sarathkumar1, G.C. Montanari, R. Sarathi, M. Srinivasan1, R. Karthik, J. Sivadasan, *A new technique for recovering aged mineral oil to promote lifetime and sustainability*, Frontiers in Materials, pp.1-14, July 2023.
12. J.S. N'cho, I. Fofana, A. Beroual, *Pretreatment of Fuller's earth with nitrogen*, Heliyon, **6**, pp.1-5, 2020.

13. A. Raymon, R. Karthik, *Reclaiming aged transformer oil with activated bentonite and enhancing reclaimed and fresh transformer oils with antioxidants*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **22**, 1, pp. 548-555, Feb. 2015.
14. AI Hafez, NS Gerges, HN Ibrahim, WS abou El-magd, AI Hashem, *Evaluation of kaolin clay as natural material for transformer oil treatment to reduce the impact of ageing on copper strip*, Egyptian Journal of Petroleum, **26**, 2, pp. 533-539, 2017.
15. L. Safiddine, H.-Z. Zafour, U.M. Rao, I. Fofana, *Regeneration of transformer insulating fluids using membrane separation technology*, Energies, **12**, 3, pp. 368, 2019.
16. A.-M. Aciu, M.C. Nițu, A.I. Scornea, *Study of zeolitic molecular sieves for the treatment of transformer oils*, International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague-Czech Republic, pp.1-6, 20-22 July 2022.
17. A.-M. Aciu, M.C. Nițu., D. Ștefan, *Extending the life of transformer units through maintenance based on insulation revitalization*, 12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE; Iași, România, pp. 37-42, , 20-22 October 2022.
18. U. Elele, A. Nekahi, A.Arshad, I. Fofana, K. McAulay, *Oil quality index model verification and validation using total acid number and interfacial tension experimental data*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **31**, 3, June 2024.