

9. savjetovanje HRO CIGRÉ
Cavtat, 8. - 12. studenoga 2009.

Ivanka Radić, dipl.ing.
Končar- D&ST
ivanka.radic@koncar-dst.hr

Anita Mareković, dipl.ing
Končar- D&ST
anita.marekovic@koncar-dst.hr

Mr.sc. Ivan Sitar, dipl.ing.
Končar- D&ST
ivan.sitar@koncar-dst.hr

Branka Domitrović, dipl.ing.
Končar- D&ST
branka.domitrovic@koncar-dst.hr

IZOLACIJSKI MATERIJALI VIŠE TOPLINSKE KLASE

SAŽETAK

Izolacijski materijali više toplinske klase prikazani u ovom referatu su minimalno toplinske klase F (155°C) i ugrađeni su u prototip transformatora za elektromotorni vlak. Zbog više radne temperature transformatora klasični izolacijski materijali toplinske klase A (105 °C) se nisu mogli koristiti. Budući da su naglašeni zahtjevi za sigurnost, nezapaljivost i biorazgradivost umjesto mineralnog ulja, izolacijski medij u ovom transformatoru je sintetski ester.

Veliki dio krute izolacije čini Nomex, idealan izolacijski materijal do 220°C, i materijal od staklene tkanine na bazi epoksidne smole, a brtveni materijal je H-NBR –hidrirani nitril-butadien kaučuk.

U referatu su prikazane glavne karakteristike materijala više toplinske klase i neka od ispitivanja koja su rađena s posebnim osvrtom na njihovo ponašanje pri povišenim temperaturama i međusobnu kompatibilnost.

Ključne riječi: viša toplinska klasa, sintetski ester, Nomex, stakleno tvrdo tkivo, brtveni materijal

INSULATING MATERIALS OF HIGH THERMAL CLASS

SUMMARY

Insulating materials described in this report have at least thermal class F (155°C) and were mounted into prototype transformer for EMU. Because of high working temperature of transformer, use of usual insulating material of thermal class A (105°C) was not an option. Requests for security, flammability and biodegradation were high, so instead of using mineral oil as insulating media synthetic ester was used.

High percentage of hard insulation in transformer is Nomex which is ideal for temperatures up to 220°C, and material of glass cloth based on epoxy resin. Sealing material is H-NBR – hydrogenated nitrile butadiene rubber.

This report represents main characteristics of materials with high thermal class and some of testings that were done, followed by comments on their behavior at high temperatures and their mutual compatibility.

Key words: high thermal class, synthetic ester, Nomex, glass cloth, sealing material

1. UVOD

Izolacijski sustav transformatora najčešće čine kombinacija tekućeg izolacijskog medija (mineralno ulje, silikonsko ulje, sintetski ili prirodni esteri) i krute izolacije. Kruta izolacija može biti celuloza (prešpan, kraft papir, natron papir, drvo...) ili necelulozni materijali (različiti sintetički polimeri – aramidni papir, stakleno tvrdo tkivo, poliesteri, poliamidi,...).

Najčešći izolacijski sustav transformatora je mineralno ulje-celuloza. Zbog svojih dobrih karakteristika koju ovakav sustav ima, koristi se u transformatorima preko 100 godina. Međutim, kad je radna temperatura transformatora viša ($>105^{\circ}$), te kad imamo naglašene zahtjeve za sigurnost i nezapaljivost, ovakav sustav to ne može zadovoljiti. Idealan izolacijski sustav za ovakve zahtjeve je sintetski ester-Nomex.

Sintetski organski ester za transformatore ima visoku točku zapaljenja (322°) i visok stupanj biorazgradivosti. Koristi se tamo gdje su naglašeni zahtjevi zaštite okoliša i sigurnosti.

DuPont je razvio Nomex još 1961. godine kao proizvod koji ima veliku otpornost na gorenje i dimenzionalnu stabilnost. Svjetska proizvodnja Nomex-a u posljednja se tri desetljeća utrostručila, sa dodatnom tendencijom rasta u budućnosti. Navedeni podatak govori o njegovoj posebnoj kvaliteti koja ga izdvaja među ostalim neceluloznim materijalima čime je našao svoju primjenu u širokom industrijskom području; od zaštitne odjeće (vatrogasci), automobilske i zrakoplovne industrije pa do električne izolacije. Razlog tome su njegova odlična izolacijska svojstva pri visokim temperaturama. No, s druge strane, Nomex je zaštićeni znak DuPont-a i ima vrlo visoku cijenu.

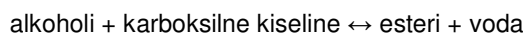
Tijekom 2008. godine razvijen je prototip transformatora za elektromotorni vlak. Karakteristično za transformator je njegova visoka radna temperatura (temp. ulja 110°C ; temp. namota 125°C) i smještaj na krovu vlaka, što ujedno naglašava važnost zahtjeva za sigurnost putnika i okoliša.

Izolacijski sustav ovog transformatora čine sintetski ester i necelulozne komponente sastavljene uglavnom od Nomex-a i staklene tkanine na bazi epoksidne smole toplinske klase F i H. Korišteni su i drugi materijali (poliesteri, poliamidi). Svi materijali za koje nije bila poznata međusobna kompatibilnost i temperaturna otpornost ispitivani su, a neki od rezultata su prikazani u ovom radu. U radu su također prikazana i neka od standardnih ispitivanja materijala i ulja koja se rade u laboratoriju Ulazne kontrole Končar D&ST-a.

2. IZOLACIJSKI I BRTVENI MATERIJALI TRANSFORMATORA ZA EMV

2.1. Tekuća izolacija – sintetski organski esteri

Sintetski organski esteri su izolacijske tekućine koji nastaju kao produkt reakcije kemijske sinteze (esterifikacije) između polivalentnih alkohola i viših masnih kiselina.



Osnovni elementi od kojih se sastoje su ugljik, vodik i kisik. Zbog svojih iznimnih svojstava koriste se kao rashladni mediji u transformatorima čije su radne temperature puno više od transformatora čiji su rashladni mediji mineralna ili silikonska ulja. Karakteristike koje ih izdvajaju su visoka točka zapaljenja ($>300^{\circ}\text{C}$), čime su klasificirane kao tekućine K-klase (prema IEC 61100), te visoki stupanj biorazgradivosti (99% nakon 28 dana) što ih svrstava u „environmental friendly“ tekućine i „tekućine neopasne za vodu“ prema Umwelt Bundes Amt (UBA) u Njemačkoj [1].

Midel[®] 7131 je sintetski ester kojeg odlikuju sve ove ranije navedene karakteristike i koji svojom kvalitetom zadovoljava zahtjeve prema IEC 61099 za nekoristene sintetske estere tip T1[2]. Zbog svoje izuzetne stabilnosti kod visokih temperatura, dugotrajne mogućnosti zadržavanja svojstava efikasnog rashladnog medija kao i dobre biološke razgradnje, Midel[®] 7131 se koristi tamo gdje su naglašeni zahtjevi za povećanom sigurnosti od zapaljivosti kao i u područjima gdje je visoko prioritarna briga za očuvanjem okoliša.

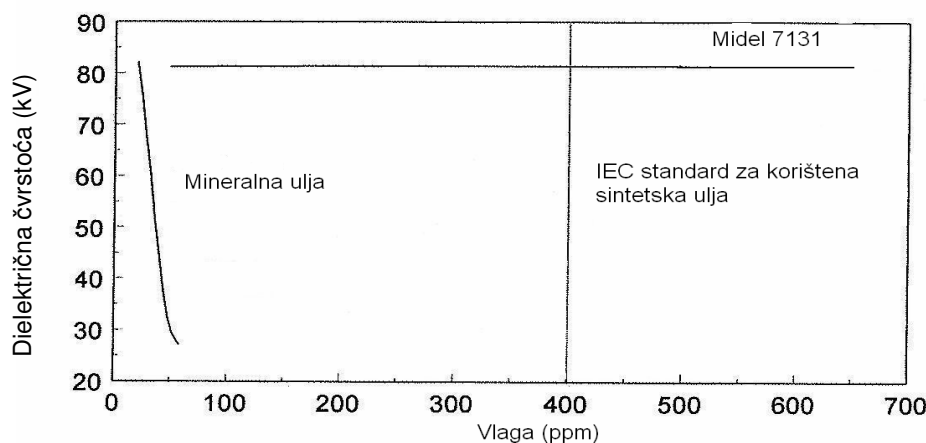
Midel[®] 7131 je sintetska tekućina niske akutne i kronične toksičnosti, niskog tlaka para u radnim uvjetima, te dobrih termičkih i izvrsnih dielektričnih svojstava, što ju čine otpornom na električna izbijanja.

Midel® 7131 je izolacijska tekućina koju odlikuje velika mogućnost apsorpcije vlage bez narušavanja dielektričnih i ostalih svojstava i kvalitete. Ta odlika daje veliku prednost sintetskim uljima u odnosu na mineralna. Dozvoljen sadržaj vlage za nova ulja i ona korištena vidljiv je u tablici I.

Tablica I. Standardne vrijednosti za sadržaj vlage

Standard	Sadržaj vlage, ppm
IEC 61099 - Nekorišteni sintetski esteri	max. 200
IEC 61203 - Korišteni sintetski esteri	max. 400
IEC 60296 - Nekorištena mineralna ulja	max. 30/40*
IEC 60422 - Korištena mineralna ulja	max. 25
* doprema u cisternama/bačvama	

Dozvoljeni sadržaj vlage za sintetske estere u odnosu na mineralna ulja se značajno razlikuje. Ta činjenica nas navodi i na različitu interpretaciju rezultata sadržaja vlage ovisno o vrsti ulja koja se nalazi u transformatoru. Isto tako, poznato je da je sadržaj vlage usko povezan sa dielektričnim svojstvima. Na slici I. prikazana je ovisnost dielektrične čvrstoće i vlage kod Midela® 7131 i mineralnih ulja, na sobnoj temperaturi. Vrlo je jasno da čak i mali sadržaj vlage u mineralnom ulju uzrokuje značajno narušavanje vrijednosti dielektrične čvrstoće. Suprotno tome, Midel® 7131 zadržava visoku dielektričnu čvrstoću (>75 kV) kod porasta vlage čak do 550 ppm [3].



Slika 1. Utjecaj vlage na dielektričnu čvrstoću Midel® 7131 i mineralnog ulja

U tablici II. prikazana su fizikalno-kemijska svojstva Midel® 7131 uzetog iz PVC kontejnera (dostavno stanje), iz Orko postrojenja –prilikom obrade i punjenja u transformator i iz transformatora prije ispitivanja.

Tablica II. Usporedba fizikalno-kemijskih svojstava Midela® 7131 u tri faze procesa

Svojstva	Mjerna jedinica	PVC kontejner	Orko postrojenje	Transformator - prije ispitivanja
Izgled	--	bistar	bistar	-
Gustoća	mg/cm ³	0.97	0.973	-
Sadržaj vlage	mg/kg	45	1.9	-
Dielektrična čvrstoća	kV	78.83	84.85	79.05
Plamište	°C	330	325	-

U tablici II. vidljivo je da, osim kod sadržaja vlage, nema znatnijih promjena u vrijednostima pojedinih parametara. Sadržaj vlage u uzorku Midel® 7131 uzetom iz Orko postrojenja je puno manji nego kod Midela® 7131 u dostavnom stanju jer se, prije punjenja u transformator, ulje obrađuje te mu se na taj način automatski uklanja početni sadržaj vlage.

Analiza sadržaja plinova u izolacijskom ulju primjenjuje se u preventivnom praćenju stanja transformatora. Da bi se dobila potpuna slika stanja transformatora tj. odstupanje od početnih vrijednosti, vrlo bitan podatak je sadržaj plinova prije puštanja transformatora u pogon. Kao mineralno ulje, i sintetski esteri također stvaraju smjesu plinova što je posljedica termičkog naprezanja (stresa). Kod izloženosti spomenutim stanjima Midel® 7131 stvara puno manje plinova nego mineralno ulje [4]. U tablici III. prikazane su vrijednosti rezultata ispitivanja plinova u Midel® 7131 metodom plinske kromatografije.

Tablica III. Kromatografska analiza plinova otopljenih u sintetskom ulju (Midel)

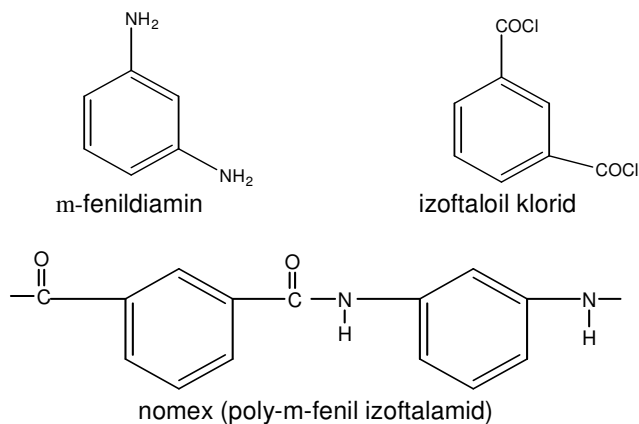
PLIN	KONCENTRACIJA, µl/l (ppm)		
	Prije svih ispitivanja	Poslije naponskih ispitivanja, prije zagrijavanja	Poslije zagrijavanja
Vodik, H ₂	ND	13	14
Metan, CH ₄	0,9	6,8	7,4
Acetilen, C ₂ H ₂	ND	2,8	2,5
Etilen, C ₂ H ₄	ND	15,4	15,2
Etan, C ₂ H ₆	ND	0,7	0,5
Ugljični monoksid, CO	3	41	51
Ugljični dioksid, CO ₂	255	771	1079
Kisik, O ₂	4117	4316	4804
Dušik, N ₂	15273	15851	17622
Ukupni sadržaj plina u ulju, ml/l	20,1	21,1	23,5

Promjene u vrijednostima koncentracije plinova u sva tri uzorka su u granicama prihvatljivih vrijednosti za ulje u transformatoru prije puštanja u pogon.

2.2. Kruta izolacija i brtveni materijali

2.2.1. Nomex

Nomex je sintetički aromatski poliamid, polimer poznat kao aramid. Kemijski naziv za Nomex je poly-(m-fenil-izoftalamid) koji se dobije reakcijom m-fenildiamina i izoftaloil klorida.

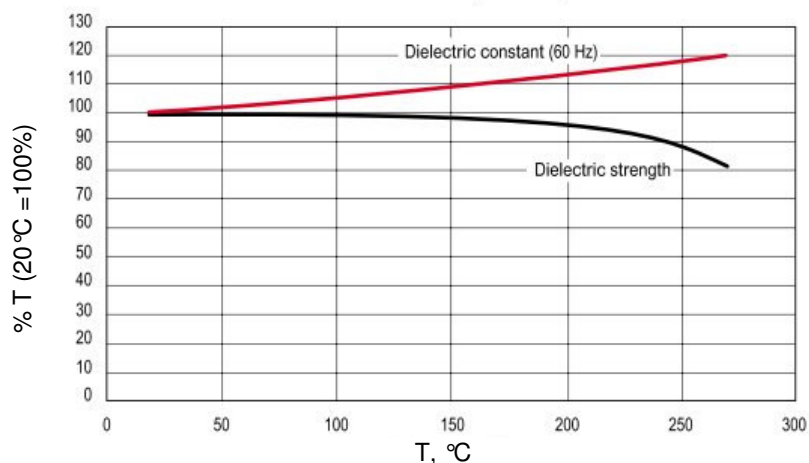


Slika 2. Kemijske strukture nomex-a i komponenti od kojih se dobije

Danas se vrlo često u transformatorima koriste hibridni izolacijski sustavi u kojima je dio celulozne izolacije zamijenjen sa Nomex-om. Hladnija područja u transformatoru se izoliraju tradicionalnim materijalima (celulozom) a Nomex se stavlja na najtoplija mjesta.

Zamjenom klasičnog celuloznog papira Nomex-om dobiva se stabilnost na visokim temperaturama, visoka dielektrička otpornost, nizak faktor gubitaka na radnoj temperaturi i niska apsorpcija vlage.

Nomex je službeno klasificiran kao 220 °C izolacijski materijal što se i potvrdilo iskustvima u praksi već više od 40 godina. Na slici 3. vidi se da temperatura ima mali utjecaj na električna svojstva Nomex-a.



Slika 3. Utjecaj temperature na električna svojstva Nomex-a tip 410 - 0,25mm

Nomex je kompatibilan (i komercijalno se koristi) sa svim transformatorskim izolacijskim medijima (mineralnim, silikonskim i sintetskim esterima). Izolacijski sustav Nomex – sintetski ester

dokazano je adekvatan za primjenu u F toplinskoj klasi i može se koristiti u slijedećim slučajevima [2]:

- Da se smanji masa transformatora ako su dani nazivni podaci
- Da se povećaju nazivni podaci ako su masa i dimenzije transformatora zadani
- Da se poboljšaju termička svojstva uslijed preopterećenja
- Da se izbjegne rizik od požara.

Jedini nedostatak ovakvog sustava je visoka cijena. Dio krute izolacije koja nije u direktnom kontaktu s najvišim temperaturama može se zamijeniti sa jeftinijim materijalima toplinske klase F što je u prototipu transformatora za elektromotorni vlak i bio slučaj.

U transformatoru za elektromotorni vlak korišten je Nomex tip T410 –originalni oblik kalendriranog papira, za izolaciju vodiča, slojnu izolaciju te izolaciju priključaka. Ulazna kontrola Nomex-a radi se standardno u laboratoriju Ulazne kontrole Končar D&ST-a (Tablica IV).

Tablica IV. Ulazna kontrola Nomex-a; Laboratorij: Končar D&ST (IEC 60819)

VRSTA ISPITIVANJA	Nomex 0,05mm	Nomex 0,18mm	Nomex 0,25mm
Debljina, mm	0,049	0,182	0,254
Gustoća, g/cm ³	0,844	1,003	1,008
Sadržaj vlage, %	5,710	4,690	4,050

Također su ispitivani međusobno slijepjeni komadi Nomex-a da se vidi utjecaj ljepljivosti na izolacijski medij. Nema utjecaja materijala na dielektrička svojstva estera.

Tablica V. Ispitivanje otpornosti na sintetski ester - slijepjenih komada Nomex-a.

Ljepilo: estersko dvokomponentno. Uvjeti ispitivanja: 125°, 168 h; Končar Institut

KARAKTERISTIKE ULJA	„slijepa proba“	Sintetski ester + uzorak
Izgled	bistro	bistro
Boja	<0,5	<0,5
Neutralizacijski broj mg KOH/g	0,05	0,05
Gran. površinska napetost 20°C, mN/m	22	22
Faktor dielektričkih gubitaka, tan δ, 90°C	0,047	0,071
Spec. električni otpor, 90°C, GΩm	4	3

2.2.2. Stakleno tvrdo tkivo

Veliki dio izolacije u transformatoru za elektromotorni vlak čini materijal od staklene tkanine i veziva na bazi epoksidne smole, termičke klase F i H. Materijal je specificiran prema IEC 60893 kao tip EP GC 203.

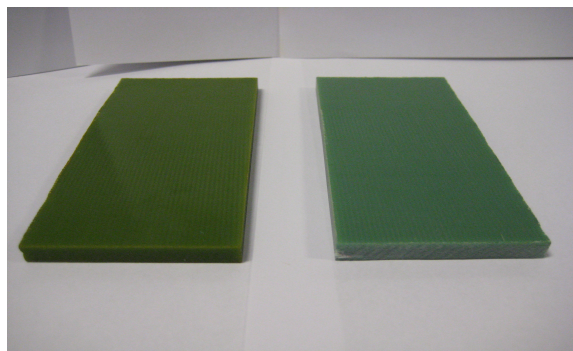
Stakleno tvrdo tkivo u ovom transformatoru čini dio izolacije: nosač priključnih vodiča, ploču za razdiobu ulja, navojnike, matice, izolacijske cjevčice te kragne. Ovaj materijal se također, već dugo koristi i ugrađuje u transformatore te su poznata njegova svojstva i kompatibilnost sa izolacijskim medijima.

Ispitivanjem utjecaja sintetskog estera na stakleno tvrdo tkivo pri povišenoj temperaturi nije došlo do promjene fizikalnih karakteristika tj. nije došlo do apsorpcije estera. Također, u uzorku estera nije došlo do promjena karakteristika tj. kontaminacija od materijala.

Tablica VI. Ispitivanje utjecaja izolacijskog medija na EP GC 203

Uvjeti ispitivanja 125°, 168h; Laboratorij: M&I Materials (UK)

	Dimenzije / mm	Boja
Slijepa proba	6,4	zelena
Uzorak+ MIDEL® 7131	6,4	tamno zelena



Slika 4. Slike uzoraka staklenog tvrdog tkiva nakon ispitivanja (testni uzorak i slijepa proba)

Za brtvljenje dijelova od staklenog tvrdog tkiva korišteno je silikonsko brtvilo čija se kompatibilnost s izolacijskim medijem također ispitala. Rezultati ispitivanja su potvrdili kompatibilnost ovih materijala.

Tablica VII. Masa testiranih uzoraka i karakteristike estera na početku (1) i nakon 168h pri 140°C (2). Laboratorij : M&I Materials (UK)

	Uzorci				Sintetski ester			
	Početna masa	Krajnja masa	Povećanje mase		Boja 1	Boja 2	Neutral. br. 1	Neutral.br 2
	g	g	g	%	HU	HU	mgKOH/g	mgKOH/g
Testni uzorak	18.4706	18.5176	+0.0470	+0.25	60	515	0.023	0.366
140°C slijepa proba	18.3872	18.3775	-0.0097	-0.05	60	520	0.023	0.349
22°C ref. uzorak	18.3549	18.3549	0	0	60	60	0.023	0.023



Slika 5. Uzorci sintetskog estera (MIDEL® 7131) nakon 168 h pri 140°C i referentnog uzorka pri sobnoj temperaturi

2.2.3. Brtveni materijali

Kao brtveni materijal korišten je H-NBR, hidrirani nitril-butadien kaučuk (visokozasićeni nitril). Materijal je odabran zbog svojih poboljšanih karakteristika u odnosu na klasični NBR a to su, prije svega, šira toplinska stabilnost (temperaturni rang -30° do 150°), šira kemijska otpornost i veći otpor na istezanje.

Kvalifikacijsko ispitivanje ove vrste gume kao i kompatibilnost sa sintetskim esterom pokazuju zadovoljavajuću stabilnost na zraku i u esterskom ulju, pod uvjetima primijenjenog termičkog naprežanja. Utjecaj gume na izolacijsko ulje je zanemariv.

Tablica VIII. Kvalifikacijsko ispitivanje gume; Laboratorij: Končar Institut

VRSTA ISPITIVANJA	Uzorak	Metoda ispitivanja
Dostavno stanje		
Izgled i boja	glatka, crna	vizualno
Tvrdoća, Shore A	61	HRN G.S2.125
Gustoća, g/cm ³	1,24	HRN G.S2.123
Nakon kondicioniranja na zraku (125°C,168h)		
Tvrdoća, Shore A	64	HRN G.S2.125
Trajna deformacija (sabijanje za 25% debljine), %	24,8	HRN G.S2.130
Promjena volumena, %	-1,9	HRN G.S2.129
Promjena mase, %	-1,9	HRN G.S2.129
Nakon kondicioniranja u ulju „Midel (125°C,168h)		
Tvrdoća, Shore A	62	HRN G.S2.125
Trajna deformacija (sabijanje za 25% debljine), %	24,9	HRN G.S2.130
Promjena volumena, %	+0,64	HRN G.S2.129
Promjena mase, %	+0,23	HRN G.S2.129

Tablica IX. Ispitivanje kompatibilnosti s esterskim transformatorskim uljem
Uvjeti ispitivanja: 168h, 125°. Laboratorij: Končar Institut

KARAKTERISTIKA ULJA	Ulje nakon kondicioniranja gume	Ulje „slijepa proba“	METODE ISPITIVANJA
Izgled toplo ohlađeno	Čisto, bistro	bistro	Vizualno
Boja (skala DIN 51578)	neznatno zamućeno	bistro	DIN 51578
Granična površinska napetost/20°C, mNm	0,5	<0,5	ASTM D971
Neutralizacijski broj, mg KOH/g	21	22	IEC 62021
Faktor dielektričkih gubitaka, tan δ, 90°C	0,0304	0,068	IEC 60247
Spec. električni otpor, 90°C, GΩm	6,0	2,0	IEC 60247

U transformatoru za elektromotorni vlak, H-NBR se koristio kao brtveni profil za usmjeravanje ulja u namote (odvajanje ulaza-izlaza ulja), te kao pločevina za ležište aktivnog dijela i prigušnica i za mehaničke veze prema kotlu.

2.2.3. Ostali materijali - kanalni umetci i Cu vodič Elumeg 155

Za formiranje rashladnih kanala u ovom transformatoru mogu se koristiti kanalni umetci od Nomex-a. No zbog relativno visoke cijene ovog materijala za navedenu svrhu mogu se koristiti i drugi materijali. Korišteni kanalni umetci sastoje se od od poliamidnih letvica i poliesterske trake. Budući da se radi o dva različita materijala, analizirali su se odvojeno.

Radi sigurnosti od loma vodiča, uslijed vibracija, između VN namota i krutih dijelova priključaka VN namota korišten je bakreni vodič Elumeg 155 izoliran Nomex-om i poliestrom. Vanjski poliesterski sloj je ispitan na kompatibilnost sa sintetskim esterom.

Tablica X. Kompatibilnost sa sintetskim esterom. Uvjeti ispitivanja 125°, 168h.
 Uzorci: 1a- poliamidna letvica; 1b-poliesterska traka; 2 –vanjski sloj Cu vodiča.
 Laboratorij: Končar Institut

KARAKTERISTIKE ULJA	«slijepa proba»	Sintetski ester + uzorak 1a	Sintetski ester + uzorak 1a	Sintetski ester + uzorak 2
Izgled boja	Bistro < 0,5	Bistro < 0,5	Bistro < 0,5	Bistro < 0,5
Neutralizacijski broj, mg KOH	0,05	0,05	0,05	0,05
Granična površinska napetost/20°C, mNm	22	22	22	22
Faktor dielektričkih gubitaka, tan δ, 90°C	0,047	0,052	0,0475	0,055
Spec. električni otpor, 90°C, GΩm	4	4	4	3

Ispitivanje pokazuje da, pod uvjetima izlaganja, materijali nemaju utjecaja na kvalitetu sintetskog estera.

3. ZAKLJUČAK

Greške u izolacijskom sustavu uzrokuju najozbiljnije i najskuplje probleme u transformatoru te se zbog toga izolacijske komponente moraju pažljivo odabrati prilikom projektiranja transformatora imajući u vidu radne i ostale uvijete predmetnog transformatora.

Prilikom odabira materijale za prototip transformatora za elektromotorni vlak, razmatrali su se i ispitivali materijali koji su već dugo u upotrebi, ali neke njihove karakteristike nisu bile do kraja poznate. Pored standardnih ispitivanja materijala pri ulaznoj kontroli, u ovom slučaju ispitivana je i međusobna kompatibilnost materijala te otpornost materijala pri višim temperaturama.

Nakon što je transformator uspješno prošao završna električna ispitivanja (rutinska, tipska i specijalna) kao i ispitivanja na udar i vibracije, može se reći da su materijali, analizirani u ovom radu, bili dobar izbor te se mogu koristiti i u budućim izvedbama sličnih ili istih transformatora.

4. LITERATURA

- [1] M. Heathcote, "The J&P Transformer book", Read Educational and Professional Publishing, 1998.
- [2] L. Kiss, O. Potocnik "Desing, manufacture and thermal characteristic of a Nomex -Midel insulated high-temperature locomotive transformer" 3rd International ASTA Symposium, may 1986, Vienna.
- [3] IEC 60 819-1 Non-cellulosic papers for electrical purposes – part 1 Definitions and General requirements, veljača 1995.
- [4] IEC 60 893-1 Insulating materials- Industrial rigid laminated sheets based on thermosetting resins for electrical purpose – part 1 Definitions and general requirements, siječanj 2004.
- [5] I. Radić, S. Baršun, S. Nedić, RE003 „Izolacijski materijali i AKZ transformatora MOZ 1510-27,5“, 2009.
- [6] IEC 61099-1992 Specification for unused syntetic organic esters for electrical purposes
- [7] M&I Materials, Tecnical Department Report, Summary report on the high temperature perfomance of Midel® 7131
- [8] Techical Datasheet No 2 for Midel 7131