

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

*Кафедра «Локомотиви»*

«ДО ЗАХИСТУ»

в.о. зав. кафедрою *Б.Є. Боднар*

« 12 » 12 2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

Спеціалізація «Локомотиви та локомотивне господарство»

**ПІДВИЩЕННЯ НАГРІВОСТІЙКОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ  
ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ**

**INCREASE OF HEAT RESISTANCE OF TRACTION ELECTRIC MOTORS  
DURING OPERATION IN EXTREME CONDITIONS**

**0032.160133.000.04MP.ПЗ**

Керівник дипломного проекту *В.Н. Сердюк*

Нормоконтролер *Л.В. Колодій*

Виконавець: студент групи ЛГ2021 *Д.В. Винник*

Student *D.V. Vynnyk*

2021

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	
1 АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н В СВІТОВОМУ ТА ВІТЧИЗНЯНОМУ ЛОКОМОТИВОБУДУВАННІ.....	
1.1 Конструкції систем електричної ізоляції .....	
1.2 Розробки та застосування систем електричної ізоляції нагрівостійкості Н в історичному часі.....	
1.3 Компоненти електричної ізоляції, які входять в систему електричної ізоляції	
1.4 Причини виходу з ладу тягових електродвигунів на ПАТ Укрзалізниця.....	
1.5 Аналіз технології ремонту тягових електродвигунів на заводах ПАТ Укрзалізниця.....	
1.6 Структура електроізоляційного матеріалу, що входить в систему електричної ізоляції, і системи в цілому.....	
1.7 Теплопровідність матеріалів, що входять в систему електричної ізоляції .....	
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	
2.1. Розрахункові схеми теплових опорів виткової ізоляції .....	
2.2. Розрахункова схема теплового опору корпусної ізоляції.....	
2.3 Розрахункова схема теплового опору пазовій ізоляції .....	
2.4. Дослідження теплопровідності і компонентів, що входять в електроізоляційний матеріал і систему електричної ізоляції.....	

						<i>0032160133.000.04MP.ПЗ</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		<i>Винник</i>			<i>Підвищення нагрівостійкості тягових електродвигунів при експлуатації в екстремальних умовах</i>	Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.		<i>Сердюк</i>						
Реценз.						<i>УДУНТ ,зр. ЛГ 2021</i>		
Н. Контр.		<i>Колодій</i>						
Затверд.								











# 1 АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н В СВІТОВОМУ ТА ВІТЧИЗНЯНОМУ ЛОКОМОТИВОБУДУВАННІ

У 60-х роках минулого століття для збільшення нагрівостійкості системи електричної ізоляції велися розробки по створенню нагрівостійких полімерів, які повинні володіти високими електрофізичними і механічними характеристиками при тривалому впливі високих температур від 180°C і вище. Одним з найбільших успіхів на шляху створення таких полімерів є поліімід. До цього часу він успішно застосовується в якості виткової та корпусної ізоляції в тягових електродвигунах. Поліімід – нагрівостійкий та вогнестійкий полімер, витримує досить високі температури (до 500°C), зберігає високу механічну міцність після тривалого впливу температури 250-300°C.

Через високу вартість поліімід в чистому вигляді при виготовленні нових електричних машин в Україні не застосовується, а при ремонті його не застосовували навіть в композиціях. За кордоном поліімід широко застосовується у всіх видах (плівка, лаки, смоли, клеї, волокна та композиційні матеріали на його основі).

## 1.1 Конструкції систем електричної ізоляції

В даний час поліімід застосовують ряд зарубіжних фірм які випускають тягові електродвигуни з системою електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н.

Фірма Electro Motive Division (відділення General Motors Co, США), застосувавши в 1965р ізоляцію з поліамідною плівкою в тягових електродвигунах D-II, підвищила потужність на 20 - 25% та одночасно знизила перегрів обмотки якоря на 20°C [1]; випускалися в середині 70-х років цією фірмою електродвигуни D-97 також мали поліамідну плівкову ізоляцію. Ізоляція провідників (виткова ізоляція) виконана плівкою КЕПТОН F, корпусні – у

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.160133.000.04MP.ПЗ





то за рахунок зниження товщини ізоляції довжина обмотки зменшується на 7% і приблизно на 5% – загальна маса. З урахуванням високої вартості поліамідної плівки вартість двигунів знизилася тільки на 3%.

Фірма Alstom застосовує в даний час провідники з поліамідною плівковою ізоляцією в усіх випущених електродвигунах для електровозів. Електродвигуни потужністю 350 кВт газотурбовоза (наприклад, локомотив високошвидкісного експресу Париж - Ліон, швидкість 300 км/г) також виконані з поліамідною витковою ізоляцією, а головний генератор має виткову та корпусну поліамідну ізоляцію.

Експлуатовані електровози серії СС6500, тягові двигуни яких мають поліамідну виткову ізоляцію, водять такі відомі французькі потяги-експреси, як Mistral (Париж - Ліон - Марсель), Capital (Париж - Тулуза), Drapeau і Etendard (Париж - Бордо), Puerta del Sd (Париж - Іспанія). Ці локомотиви мають по дві пари двигунів потужністю по 2983 кВт (кожен з приводом на дві осі) і експлуатуються при швидкостях до 200 км/г. Фірма Chemins de Fer Siss застосовує плівку КЕПТОН при виготовленні якірної обмотки тягових електродвигунів потужністю 515 кВт. Просочення обмоток проводилася кремнійорганічним лаком [11].

В середині 70-х років минулого століття для 300 локомотивів, призначених для південно-африканських залізниць і виготовлених фірмою Union Carriage and Wagon Co Ltd, а з кінця 1970 р англійською фірмою English Electric-аб1 Traction Ltd, були сконструйовані і спільно з фірмою First Electric Corporation of South Africa виготовлені тягові електродвигуни потужністю 555 кВт на 3000 В, надійно працюють при пікових навантаженнях до 4000 В. Виткова ізоляція якорів цих ТЕД виконана стрічкою шириною 12,5 мм з поліамідної плівки КЕПТОН (один шар в півнахлесту), корпусна ізоляція – гільзового з плівки типу 30ОН в комбінації з іншими матеріалами для підвищення короностійкості. Британським стандартом BS - 173 поліамідна ізоляція якірних обмоток віднесена до класу Н (180°С тривало), однак вона добре витримує короточасні навантаження до 400°С

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04МР.ПЗ				

[12 - 14].

Західнонімецька фірма АЕГ В виробник великих електричних машинах постійного струму потужністю 1000-1500 кВт, призначених для приводу прокатних станів, дизелів, папероробних машин, занурених насосів і т.п. почала використовувати системи електричної ізоляції класів нагрівостійкості F, H і C на основі плівки КЕПТОН. Так, в машинах класу F було забезпечено зниження маси якоря на 15% тільки за рахунок заміни традиційної виткової ізоляції (товщина між провідниками 0,35 - 0,50 мм) на поліамідну плівку (0,15 мм при тих же характеристиках), яка виконується одним шаром в півнахлесту плівки КЕПТОН F товщиною 0,0375 мм або КЕПТОН товщиною 0,025 мм. Робоча напруга електричних машин 1000 В [15].

Аналогічні роботи для різних типів електричних машин були проведені і реалізовані в промислових масштабах фірмою Siemens (ФРН), де зменшено габарити і вага машин, поліпшений тепловідвід [16].

На важких гірських маршрутах швейцарських залізниць і транс'європейських трасах відмінно зарекомендували себе в останні роки тягові електродвигуни, що випускаються фірмою Brown Boveri Co (Швейцарія) (з 1988 фірма АВВ) також з ізоляцією класу нагрівостійкості H.

Система ізоляції Silast для якірних обмоток використовується з 1965 р. За 10 років випущено понад 2000 якорів для тягових електродвигунів потужністю від 75 кВт до 1200 кВт. Основний матеріал – попередньо просочені склослюдинітові стрічки з кремнійорганічним еластомерним покриттям. Секції після ізолювання вулканізуються при високих температурах. Лобові частини ізолювались стрічкою з кремнійорганічного еластомеру. Просочення якоря не проводилося.

Нова, на той період часу, система ізоляції на основі поліамідної плівки, НОМЕКС М і скломікаленти просочувалася кремнійорганічним компаундом після складання якоря по технологічному процесу типу Comract. Лобові частини обмотки ізолювались стрічкою з кремнійорганічного еластомеру. Ті ж матеріали

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувалися в ізоляції полюсних і компенсаційних котушок. Ця система ізоляції успішно пройшла експлуатаційні випробування в двигунах локомотивів Re 4/4, а з травня 1972 року - в тягових двигунах потужністю 1338 кВт локомотивів Re 6/6 і допускає велике температурне перевантаження [12, 17].

НОМЕКС М застосований для пазової ізоляції секційних і стрижневих обмоток електричних машин важливого призначення, в тому числі і ТЕД, і передбачає нанесення безперервної корпусної ізоляції, покладеної обмоткою в якір з послідуочим просоченням без розчинника [18].

Фірма ASEA (Швеція) застосувала поліамідну плівку КЕПТОН Н товщиною 0,127 мм для ізоляції роторних стрижнів асинхронних електродвигунів класів нагрівостійкості F і H. Завдяки цьому було збільшено термін служби і безпеку роботи машин [19].

На міжнародному симпозиумі у Франкфурті в 70-х роках з проблем створення двигунів змінного струму загальнопромислового призначення з системами ізоляції класів F та H, організованому фірмою Du Pont de Nemours, особливо підкреслювалося важливе значення ароматичного поліаміду НОМЕКС для ізоляції класів F та H, в першу чергу - пазової ізоляції, так як матеріали на основі слюди і азбесту, що застосовуються в ті часи, занадто крихкі і не пружні, а поліамідна плівка дорога і не забезпечує достатню товщину пазової ізоляції. НОМЕКС з його композиційними плівками добре витримують механізоване ізолювання пазів і механічні напруги в процесі виготовлення електричної машини (короткочасні, але найбільш небезпечні) і в період її експлуатації. Згідно з даними фірми ASEA (Швеція), що проводила дослідження відповідно до рішення МЕК про створення двигунів єдиної серії, з однією з найбільш надійних та сучасних систем ізоляції класу нагрівостійкості H.

За повідомленням фірми Du Pont de Nemours з різними європейськими та американськими фірмами НОМЕКС використовується для ізоляції тягових електродвигунів метрополітену напругою 600 В (витковою ізоляцією – НОМЕКС 410 товщиною 0,05 мм, шириною 8 мм, 2 шари з перекриттям на 20% ширини

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нанесені в протилежних напрямках; корпусні ізоляція – НОМЕКС 410 товщиною 0,13 мм, гільза в три шари; міжслойна ізоляція – комбінація НОМЕКС 411 слюдяний папір – НОМЕКС 411), електричних машин постійного струму напругою 1500 В (пазова гільза – 4 шари НОМЕКС М товще, інколи 0,13 мм з нанесеним попередніми шаром адгезиву, викладка паза - НОМЕКС 410, міжслойна ізоляція – НОМЕКС М), великих електричних машин постійного струму для металургії (виткова ізоляція – НОМЕКС 410 товще, інший 0,05 мм, 2 шари в півнахлесту; пазова ізоляція - 4 шари НОМЕКС 410 товще, інколи 0,08 мм; міжслойна ізоляція - НОМЕКС 410 товще, інколи 0,25 мм). У всіх випадках застосовувалося вакуумне просочення обмоток епоксидними компаундами класу нагрівостійкості F.

Нові нагрівостійкі конструкції електричної ізоляції на основі ароматичних поліамідів і застосовуються і удосконалюються також рядом інших зарубіжних фірм.

Але навіть наведені приклади дозволяють визначити основні переваги нових видів ізоляції класів нагрівостійкості H і C і помітити тенденцію до розширення їх використання в електрообладнанні, в першу чергу з важкими або екстремальними умовами експлуатації.

## **1.2 Розробки та застосування систем електричної ізоляції класу нагрівостійкості H в історичному часі**

Конструкторські розрахунки при проектуванні нових серій електричних машин різного призначення (тягових, вибухобезпечних, металургійних і ін.), виконані в 70-х роках ХХ століття показали, що для отримання необхідних техніко-економічних показників, товщина ізоляції повинна бути істотно зменшена, нагрівостійкість збільшена (клас H або C, як правило), основні електричні характеристики покращені. Це в значній мірі визначило вибір електроізоляційних матеріалів і стимулювало дослідження поліамідної плівки

					<i>0032.160133.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



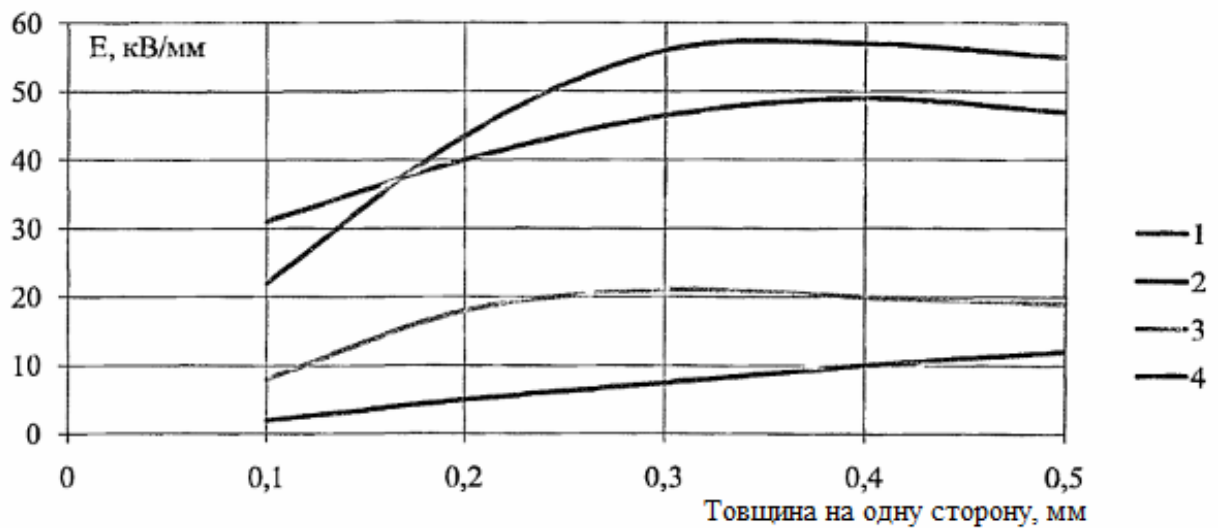


Рисунок 1.1 – Залежність електричної міцності неперервної багат шарової ізоляції від товщини (кількості шарів):

1-поліамідна плівка ПМ товщиною 0,04 мм, склеєна кремнійорганічним полімером; 2 - теж, товщиною 0,055 мм; 3 - папір НОМЕКС товщиною 0,051 мм, склеєна кремнійорганічним полімером; 4 - Мікаленти ЛФК-ТТ товщиною 0,1 мм, склеєна лаком ЕФ-5Т.

В макетах з двошаровою безперервної ізоляцією було показано, що електрична міцність плівковою ізоляції незначно змінюється при підвищенні температури до 220°C і після перебування в середовищі з 95 - 98% відносною вологістю як в початковому стані, так і після теплового старіння протягом 30 діб при температурі 250°C (табл. 1.1).

Результати, отримані при аналогічних випробуваннях двошарової ізоляції з паперу НОМЕКС товщиною 0,051 мм (температура старіння 220°C), показали, що її електрична міцність практично не змінюється при нагріванні до 220°C, а після витримки в середовищі з високою вологістю знижується на 20- 25%, в середньому до величини 15 – 16 кВ/мм. Мінімальні значення питомого об'ємного опору безперервної ізоляції з поліамідної плівки і паперу НОМЕКС, розраховані за даними макетних випробувань, наведені в табл. 1.1 ізоляція з такими властивостями повинна забезпечити хорошу працездатність електричної машини.

						0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

На макетах шаблонних якірних катушок з міді МГМ перетином 1,56x8,6 мм була проведена порівняльна оцінка властивостей виткової ізоляції, виконаної з поліамідної плівки ПМ, паперу НОМЕКС і Мікаленти ЛФК-ТТ і показана доцільність застосування нових матеріалів для виткової ізоляції. Виконані на макетах ресурсні циклічні випробування, що включали теплове старіння при температурах 220 і 250°C, теплові удари, охолодження до -50°C, вплив відцентрових сил змінної величини, вплив забруднень, зволоження (5 діб при 95-98% -ої відносної вологості) і випробування напругою показали, що:

- опір плівкової поліамідної ізоляції, просоченої компаундом К-67Ф, після зволоження помітно вище на всіх стадіях випробувань, ніж у базової скломікалентної, а тенденція до його зниження в процесі циклічних випробувань менше;

- пробивні напруги виткових та корпусних ізоляцій на основі поліамідної плівки і кремнійорганічних зв'язуючих, їх також помітно перевищує на всіх стадіях випробування пробивні напруги базової ізоляції більшої товщини. Абсолютні значення пробивних напруг істотно вище рівня можливих експлуатаційних перенапруг і свідчать про можливість тривалого подальшого використання ізоляції після обсягу випробувань, приблизно відповідного 35-40 тисяч годин роботи ізоляції при середній температурі 200°C.

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Питомий об'ємний опір плівкової ізоляції при різних умовах випробувань

Види ізоляцій	До старіння			Після 30-ї доби старіння		
	20 – 25°C	220°C	Після зволоження (48 год при 95-98%)	20 – 25°C	220°C	Після зволоження (48 год при 95-98%)
Ізоляція з поліамідної плівки	$>10^{16}$	$4,5 \cdot 10^{13}$	$3,5 \cdot 10^{13}$	$>10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^{13}$
Ізоляція з паперу НОМЕКС 0,051 мм	$>10^{16}$	$3,2 \cdot 10^{13}$	$8,0 \cdot 10^{13}$	$>10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{13}$	$3,5 \cdot 10^{13}$
Ізоляція з мікаленти ЛФК-ТТ-0,10	$>10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^{15}$	$5,2 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{11}$

На основі результатів виконаних досліджень і спільної (ВЕІ і і НДІ заводу "Електроважмаш") технологічного опрацювання на заводі "Електроважмаш" (м. Харків) виготовлені дослідні партії тягових електродвигунів тепловозів з поліамідно-кремнієорганічною плівковою ізоляцією якірної обмотки. Наведені в таблиці 1.1 параметри ізоляції і деякі характеристики двигунів наочно ілюструють ефективність застосування такої ізоляції і перспективність подальших робіт в цьому напрямку для створення систем електричної ізоляції для електричних машин з необхідними техніко-економічними показниками.

Наведені вище дані відносяться до досліджень, проведених в 70-х роках

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04МР.ПЗ				





років минулого століття до цього дня) в якості корпусної ізоляції полюсних котушок застосовується мікаленти, ізолювання котушок (і полюсних, і якірних) проводиться ручним способом, просочення методом занурення. Критерієм остаточного просочення таким методом є відсутність бульбашок на поверхні просочуючих.

Як вже зазначалося вище, за кордоном роботи по вдосконаленню систем електричної ізоляції тягових електродвигунів успішно проводяться. В Україні тільки почали повертатися до подібних робіт через високі ціни не тільки на імпорتنі матеріали, а й на готові вироби (зокрема електричні машини для експлуатації у важких умовах).

Крім того, за останні 15-20 років вартість енергоресурсів значно зросла. Нових типів тягових електродвигунів практично немає, виготовляються у відносно малій кількості.

Для економії коштів, витрачених залізницею по переміщенню вантажів використовуються старі моделі локомотивів і типи ТЕД. Починаючи з початку 90-х років тягові електродвигуни експлуатувалися з перевищенням їх повноважень і технічних характеристик, тобто склад за масою перевищував в рази допустимі норми, а недотримання правил експлуатації тягових електродвигунів призводило до виходу їх з ладу (починаючи з 2002 року ця тенденція поплила на спад).

#### **1.4 Причини виходу з ладу тягових електродвигунів на ПАТ Укрзалізниця**

На рисунку 1.2 представлена діаграма пошкоджень тягових електродвигунів.

З представлених даних видно, що приблизно половина всіх виходів з ладу двигунів пов'язана з електричною ізоляцією: пробою корпусної ізоляції, міжвиткові замикання і низький опір ізоляції.

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Ще в кінці 60-х років, як уже згадувалося вище, з'явилася поліамідна плівка, яку почали застосовувати в якості електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н і С для електричних машин з важкими умовами експлуатації. В СРСР аналогічні роботи проводилися, але широких розробок і застосування матеріалів класу нагрівостійкості не було. На сьогоднішній день електроізоляційні матеріали, що використовуються в Україні та технології виготовлення тягових електродвигунів сильно застаріли. Технологічне обладнання для їх ремонту практично не дозволяє виконувати якісний ремонт. Так, наприклад, в більшості випадків для якірних секцій ТЕД використовують голий мідний дріт марки ПММ, а для полюсних і компенсаційних котушок повсюдно на всіх підприємствах використовують неізольовану мідну шину.

На багатьох ремонтних підприємствах для полюсних і компенсаційних котушок вдруге використовують відпалений мідь. Для виткової і корпусної ізоляції використовують просочені слюдяні стрічки класу нагрівостійкості В, а в якості просочуючих складів застосовують просочувальні лаки типу ФЛ-98. Технологічне обладнання, яке знаходиться на ремонтних заводах, не дозволяє проводити якісне просочення просочувальними компаундами. Просочувальні котли не можуть використовуватися для просочення під тиском вище 2 атм і практично не призначені для компаундів. Вакуумні насоси не можуть створити глибокий вакуум нижче 200 мм рт ст в силу їх малої потужності і негерметичності технологічного обладнання.

На рисунку 1.4 представлена діаграма сушки, просочення і термообробки якоря, просоченого в просочувальному лаку ФЛ-98.

Підготовлений для просочення вузол піддають попередній сушці для видалення вологи при 170°C протягом 10 годин. За цей час відбувається полімеризація сполучного просоченої склослюдінової стрічки, летючі з внутрішніх шарів скупчуються всередині ізоляції, тому що зовнішні шари полімеризуються швидше внутрішніх. Між шарами склослюдінової стрічки залишаються повітряні проміжки. Отже, ізоляція виходить немонолітні з безліччю

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повітряних включень і подальше просочення зануренням в лак ефективності не дає. Відбувається заповнення мікротріщин і пор, що знаходяться зовні, іншими словами, відбувається лакування поверхні вузла тягового електродвигуна, виткова ізоляція залишається просоченою.

Відомо, що повітряні включення всередині електричної ізоляції негативно впливають на її електричні характеристики, погіршується її теплопровідність, збільшуються перегріви, і як наслідок знижується ресурс тягового електродвигуна.

На сьогоднішній день при ремонті тягового електродвигуна використовуються наступні матеріали:

- голий мідний дріт для якірної секції (шина для полюсних і компенсаційних катушок);
- виткова ізоляція з просоченої слюдяною стрічки (ЛСК-110ТПЛ, ЛСЕР-934ТПЛ клас нагрівостійкості В);
- корпусні ізоляція з просоченої слюдяною стрічки (ЛСК-110ТПЛ, ЛСЕР-934ТПЛ і навіть Мікаленти);
- покривна ізоляція у вигляді склострічки;
- пазова ізоляція з композиційних матеріалів ( "Ізофлекс" і йому подібні);
- міжшарова ізоляція з композиційних матеріалів або склопластиків класу нагрівостійкості В, в окремих випадках матеріал класу нагрівостійкості F;
- матеріал для розділення паза з текстоліту (клас нагрівостійкості В);
- бандаж з просоченої скло стрічки з односпрямованим волокнами;
- просочувальний лак (ФЛ-98, МЛ-92, ГФ-95 клас нагрівостійкості В);
- покривна емаль марки ГФ-92 ГС (або ХС).

Як видно, практично всі електроізоляційні матеріали відповідають класу нагрівостійкості В, а тяговий електродвигун за документами проходить з системою ізоляції класу нагрівостійкості F.

						<i>0032.160133.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



Рисунок. 1.4 – Діаграма сушки, просочення і термообробки вузлів ТЕД, просочених в лаку ФЛ-98

Для збільшення ресурсу тягового електродвигуна необхідно підібрати електроізоляційні матеріали одного класу нагрівостійкості (що відповідають умовам експлуатації), сумісні між собою за хімічними та технологічними параметрам, без погіршення електричних характеристик всієї системи. Для створення такої системи електричної ізоляції і її впровадження необхідно вивчити кожен компонент електроізоляційного (композиційного) матеріалу і всієї системи в цілому.

Матеріали, передбачувані для системи електричної ізоляції, з характеристиками, що підвищують її клас нагрівостійкості, надійність і ресурс тягового електродвигуна (по електричній частині), аналогічні наведеним вище, але мають схожу хімічну природу (основні матеріали) і близькі технологічні режими по переробці під час ремонту вузлів ТЕД:

- ізольований обмотувальний дріт для якірної секції (шина для полюсних і компенсаційних котушок), що збільшує електричні характеристики секції;
- корпусні ізоляція з просоченої слюдяною стрічки (стрічка просякнута компаундом, яким буде проводитися просочення вузлів ТЕД);

											Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04МР.ПЗ						

- просочувальний компаунд, який не містить епоксидної смоли і кремнійорганічних сполук (досягається еластичність і ремонтпридатність без збільшення енерговитрат);
- для розклинення паза використовувати склопластикові клини СПП-ЕУ;
- бандаж з просоченої склострічки з односпрямованим волокнами, час полімеризації якого не повинно перевищувати більш ніж на 2 години часу полімеризації просочувального компаунда;
- покривна емаль, яка відповідає класу нагрівостійкості основних електроізоляційних матеріалів.

Пропоновані матеріали повинні бути одного класу нагрівостійкості. Як корпусної ізоляції можуть бути використані три види слюдяних стрічок в залежності від можливостей технологічного обладнання: просочені, напівпросочені і непросочені.

## **1.6 Структура електроізоляційного матеріалу, що входить в систему електричної ізоляції, і системи в цілому**

Розглянемо більш докладно структуру кожного електроізоляційного матеріалу, що входить в систему електричної ізоляції.

### ***1.6.1 Виткова ізоляція***

Виткова ізоляція в старих конструкціях ТЕД, як правило, складається з слюдяною просоченої стрічки товщиною 0,08 мм. До складу просоченої слюдяною стрічки входять: склотканина, слюдяний папір, поліетилентерефталатна плівка і сполучна в кількості 25 – 30%. В якості сполучного можуть застосовуватися лак ЕП-934 (клас нагрівостійкості В) і компаунд КП-110 (клас нагрівостійкості F). Якість міжвиткової ізоляції в більшій мірі залежить від застосовуваних матеріалів і від кваліфікації працівника, який проводить ізолювання.

У розроблюваних системах електричної ізоляції в якості виткової ізоляції пропонується застосовувати вже ізолюваний обмотувальний дріт. Обмотувальний дріт має подвійну ізоляцію - емаль-лак, нанесений безпосередньо на провідник і

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



матеріалу, що входить в корпусну ізоляцію, на електричні та теплові характеристики. Як наводилося вище, корпусна ізоляція складається з склотканини, слюдяного паперу, полімерної плівки і просочувального складу.

У таблиці 1.2 наведені дані, що характеризують властивості кожного матеріалу, що входить в корпусні ізоляцію.

Таблиця 1.2 – Властивості, що характеризують кожен матеріал, що входить в систему ізоляції

Компонент корпусної ізоляції		$E_{пр}$	$M_{пр}$	$\lambda$ при $t = 150 \div 200^\circ C$	$\rho$ , Ом·м	$\epsilon$	нагрівостійкість	технологічність в переробці
Слюдяний папір		низька	низька	$0,06 \div 0,08$			$>300^\circ C$	малотехнологічна
Скляна тканина		низька	висока	$0,06 \div 0,08$	$10^{17}$	6,3	$>300^\circ C$	технологічна
Полімерна плівка		висока	висока	$0,08 \div 0,14$	$>10^7$	$2,1 \div 3,5$	F÷C	технологічна
Просочувальний склад	неполімерізовані	низька	низька					технологічний
	полімерізований	висока	висока	$0,24 \div 0,35$	$10^{14}$	6,0	F÷C	нетехнологічний

### 1.7 Теплопровідність матеріалів, що входять в систему електричної ізоляції

Як вже зазначалося вище, електрична ізоляція тягового електродвигуна

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>0032.160133.000.04MP.ПЗ</i>				





і використовуваних електроізоляційних лаків. Утворені повітряні включення знижують не тільки теплопровідність системи, а й електричну міцність.

Тверді неметалеві тіла (більшість матеріалів, за виключенням таких, як фарфор, скло) характеризуються значно меншими коефіцієнтами теплопровідності (полімерні плівки, полімеризовані смоли). Погана провідність тепла цих речовин пояснюється їх будовою, тому перенесення тепла здійснюється в них головним чином коливаннями молекул і атомів кристалічної решітки, а також рухливістю радикалів, сегментів довгих молекул і т.п.

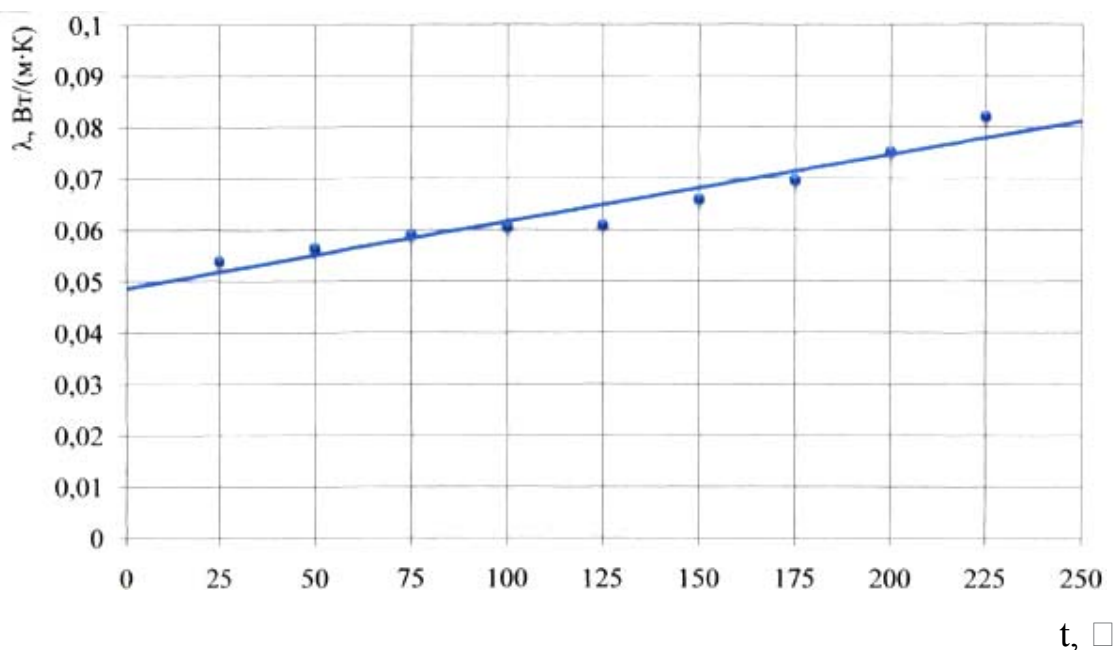


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнту теплопровідності слюдяного паперу від температури

Як вже описувалося вище, теплопровідність металів досить велика. У нашому випадку більший інтерес представляє мідь та електротехнічна сталь. Для міді  $\lambda_m = 385$  Вт/м·К, для електротехнічної сталі  $\lambda_{ел. сталі}$  становить від 20 до 45 Вт/м·К. Теплопровідність традиційних електроізоляційних матеріалів становить від 0,10 до 0,23 Вт/м·К. Внаслідок цього перепади температури в ізоляції обмоток електричних машин виходять значними, що ускладнює охолодження обмоток і обмежує величину лінійної навантаження і щільності

струму. На рисунку 1.7 схематично зображено відведення тепла  $Q$  від провідника, розташованого в пазу якоря.

Довідкових даних для кожного матеріалу, що входить в систему електричної ізоляції, і компонента, що входить до композиційного електроізоляційного матеріалу, що застосовувався в колишньому СРСР і в даний час в Україні, немає. Значення коефіцієнтів теплопровідності склотканини, слюдяного паперу і ряду компонентів, що входять в електроізоляційний матеріал і систему, наведені в таблиці 1.2, отримані дослідним шляхом і будуть описані нижче більш докладно.

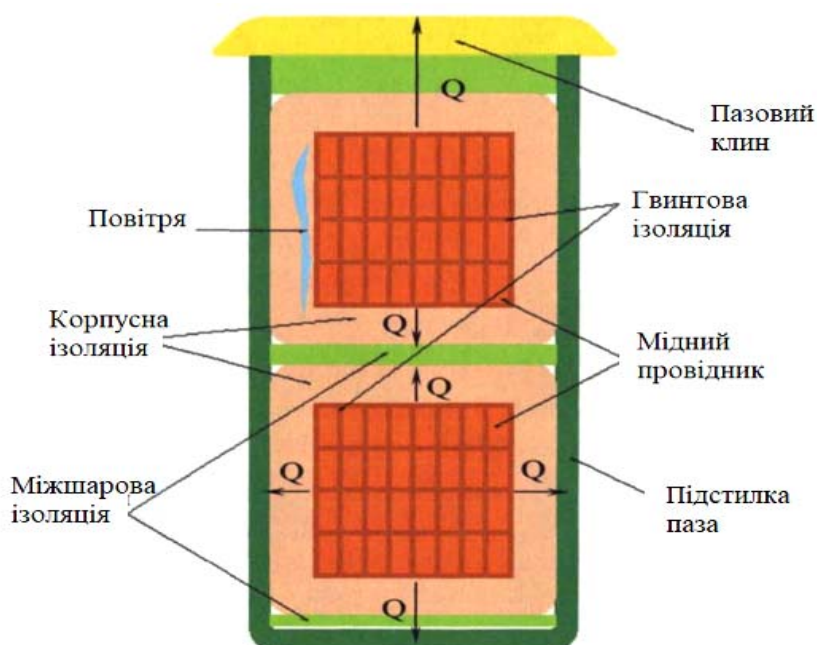


Рисунок 1.7 – Схема відводу тепла від провідників якорної секції

Очевидно, що матеріали, що входять в систему електричної ізоляції будь-якої електричної машини, мають різні коефіцієнти теплопровідності.

Для забезпечення гарної теплопровідності від провідника до "заліза" або в навколишнє середовище через електричну ізоляцію, остання повинна мати досить високий коефіцієнт теплопровідності, а так як система багатокomпонентна, необхідно підбирати матеріали з більш високими коефіцієнтами, що практично

											Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

0032.160133.000.04MP.ПЗ

неможливо. Тягові електродвигуни, експлуатовані в екстремальних умовах, повинні мати систему електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н з теплопровідністю 0,25-0,3 Вт/м·К.

Для визначення коефіцієнту теплопровідності корпусної (основної) ізоляції тягового електродвигуна розділимо компоненти, що входять до неї на органічні і неорганічні. За своєю хімічною будовою і фізичними характеристиками більш високим коефіцієнтом теплопровідності мають неорганічні речовини, у органічних речовин коефіцієнт теплопровідності значно нижче.

Корпусні ізоляції ТЕД в більшості випадків складається з слюдяної стрічки. Тому розглянемо чотирьох компонентний композиційний матеріал, в який входять: склотканина, слюдяний папір, полімерна плівка і просочувальний склад.

До органічних компонентів належать полімерна плівка і просочувальний склад, до неорганічних – слюдяний папір і склотканина.

Для склотканин, що застосовуються в електротехніці, як правило, використовують алюмоборосілікатне скло, яке має високі електричні та теплові характеристики, високий коефіцієнт теплопровідності, високу нагрівостійкість. Робоча температура до + 550°C.

Для використання в електричній ізоляції застосовувати в чистому вигляді неможливо і не технологічно. У зв'язку з цим зі скла виготовляють волокна, які можуть переплітатися між собою. Таким чином, отримують скловолокно, а вже зі скловолокна виготовляють склотканини. Склотканини в електричній ізоляції використовують в якості армуючих матеріалів і підкладок для збільшення механічної міцності матеріалів.

У слюдах проявляється різка анізотропія електрофізичних і теплофізичних властивостей через особливості кристалічної структури. У чистому вигляді кристали (луски) слюди в перпендикулярному напрямку мають високі електричні властивості і порівняно невисокий коефіцієнт теплопровідності (в порівнянні з чистою слюдою в 20 разів нижче), високу нагрівостійкість можуть застосовуватися при 600-800°C. Коефіцієнт теплопровідності слюди дорівнює

						0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

( $\lambda_{\text{сл}}$ ) 0,5 Вт/м·К. З підвищенням температури теплопровідність слюди зростає і може досягати 0,75 Вт/м·К. У той же час теплопровідність слюди паралельно верствам приблизно в 10 разів перевищує зазначені вище значення.

Наведено значення коефіцієнта теплопровідності, отримані в середині 60-х років фірмою Du Pont (США) на плівці КЕПТОН Н [19, 26] (аналог радянської або російської поліамідної плівки). З представлених значень видно збільшення коефіцієнта теплопровідності з ростом температури. На вітчизняній поліамідній плівці значення вийшли трохи нижче. На рисунку 1.8 представлена залежність коефіцієнта теплопровідності поліамідної плівки від температури.

У 2015 році ВЕЛНІІ провів дослідження теплопровідності ізоляції котушок тягових електродвигунів електровозів, були отримані результати на наступних зразках: ізоляція типу ЛМК-ТТ мала  $\lambda = 0,06-0,09$  Вт/м·К; ізоляція типу МОНОЛІТ-2 (ЛСКН-160-ТТ + компаунд ЕМТ-1)  $\lambda = 0,1-0,25$  Вт/м·К; ізоляція типу МОНОЛІТ-4 (ЛСЕК-5-СПЛ + плівка Ф-4Э0 + ЛЕС + компаунд ЕМТ-1) мала  $\lambda = 0,15 \div 0,17$  Вт/м·К; ізоляція типу ЛСЕК-5-СПЛ (ЛСЕК-5-СПЛ + ЛЕС + ФЛ-98)  $\lambda = 0,06 \div 0,12$  Вт/м·К.

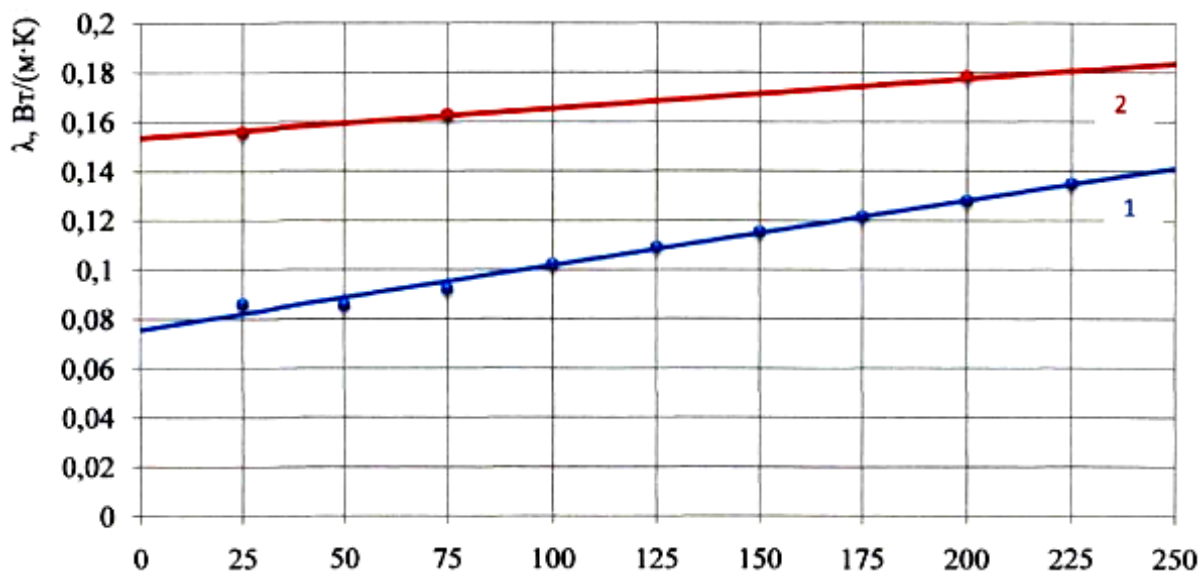


Рисунок 1.8 – Залежність коефіцієнта теплопровідності поліамідної плівки ПМ (вітчизняної – 1 і імпортової – 2) від температури

У 2015 році ВЕЛНІІ провів дослідження теплопровідності ізоляції котушок тягових електродвигунів електровозів, були отримані результати на наступних зразках: ізоляція типу ЛМК-ТТ мала  $\lambda = 0,06-0,09$  Вт/м·К; ізоляція типу МОНОЛІТ-2 (ЛСКН-160-ТТ + компаунд ЕМТ-1)  $\lambda = 0,1-0,25$  Вт/м·К; ізоляція типу МОНОЛІТ-4 (ЛСЕК-5-СПЛ + плівка Ф-4Э0 + ЛЕС + компаунд ЕМТ-1) мала  $\lambda = 0,15 \div 0,17$  Вт/м·К; ізоляція типу ЛСЕК-5-СПЛ (ЛСЕК-5-СПЛ + ЛЕС + ФЛ-98)  $\lambda = 0,06 \div 0,12$  Вт/м·К.

З представлених даних видно, що найбільшою теплопровідністю володіє система електричної ізоляції типу МОНОЛІТ-2. Також з літературних джерел [3] і з практики ізоляція такого типу має високі електричні характеристики.

Недоліком такої системи електричної ізоляції є компаунд на основі епоксидної смоли. У компаунда великий час желатинізації, що вимагає тривалого часу термообробки (24 години і більше), система не ремонтоздатна, має велику твердість і має більші внутрішні перенапруги. При частих і різких змінах температури виникають мікротріщини, що веде до зниження електричної міцності.

**Висновки до розділу.** Для зниження відсотка виходу з ладу тягових електродвигунів необхідно застосовувати при їх ремонті матеріали одного класу нагрівостійкості.

Слід провести дослідження по заміні тривалої попередньої сушки вузлів тягових електродвигунів при високих температурах на розігрів до температури  $70 - 80^\circ\text{C}$ , щоб виключити полімеризацію просочених склослюдінітових стрічок та забезпечити монолітність ізоляції при подальшому просоченні.

Потрібно вдосконалити технологію просочення вузлів тягових електродвигунів до технології вакуум-нагнітальне просочення.

Для зниження перегрівів в ізоляції вузлів тягових електродвигунів необхідно застосовувати нові електроізоляційні матеріали.

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Як вже розглядалося вище, великий вплив на багато властивостей електричної ізоляції, на потужність електричної машини впливає теплопровідність електроізоляційного матеріалу та монолітність електричної ізоляції. Якірна котушка (секція) в поперечному перерізі має прямокутний вигляд. На рисунку 1.7 схематично представлено поперечний розріз паза якоря з укладеними ізольованими якірними секціями.

### 2.1 Розрахункові схеми теплових опорів виткової ізоляції

Основним джерелом тепла в якорі є провідники (витки) якірної секції і діелектричні втрати в ізоляції. Поширення тепла відбувається по чотирьох напрямках: до стінок паза, до дна паза і у напрямку до клину. Чим монолітніше буде конструкція ізоляції на всіх напрямках, тим краще відбувається відведення тепла до заліза якоря. Розглянемо поширення тепла у бік пазової стінки від одного провідника. Між провідником і стінкою паза знаходиться три види ізоляції: виткова, корпусна і пазова. У такій конструкції усі три види ізоляції матимуть свій коефіцієнт теплопровідності або свій тепловий опір. Проста схема теплових опорів, представлена на рисунку 2.1, аналогічно електричній, без урахування наявних дефектів (повітря).



Рисунок 2.1- Схема теплових опорів електричної ізоляції від витка до стінки паза:

$R_{\text{вит}}$  – тепловий опір виткової ізоляції;  $R_{\text{корп}}$  – тепловий опір корпусної ізоляції;

$R_{\text{паз}}$  – тепловий опір пазової ізоляції

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.160133.000.04MP.ПЗ

Кожен вид ізоляції у свою чергу є багатокомпонентною системою, що складається мінімум з двох електроізоляційних матеріалів. Провідник може бути використаний як з готовою ізоляцією, так і без неї. У першому випадку виткова ізоляція складається з емалі (емальований дріт) і двох шарів склотканини, просоченої в електроізоляційному єднальному матеріалі (для зменшення механічних ушкоджень емалі). У другому випадку в якості виткової ізоляції використовують просочену склослюдинітову стрічку, що складається із склотканини, слюдяного паперу і полімерної плівки. Для просочення склослюдинітових стрічок використовують просочувальний склад: лак або компаунд. Розглядаючи поширення теплового потоку через виткову ізоляцію, можна представити схему теплових опорів, яка може мати два вигляди.

Розглянемо випадок при використанні склослюдинітової стрічки як виткової ізоляції. На рисунку 2.2 представлено ізолювання одного витка склослюдинітовою стрічкою.

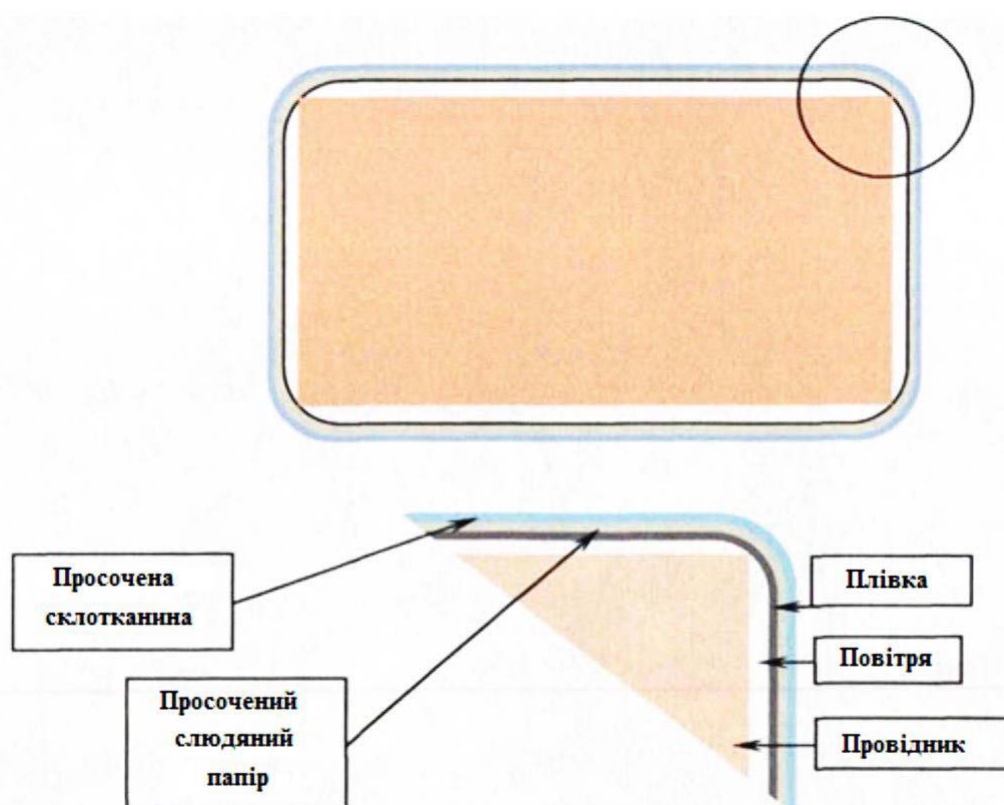


Рисунок 2.2 – Ізолювання витка склослюдинітовою стрічкою

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При використанні голого мідного провідника з подальшим ізолюванням просоченою склослюдинітовою стрічкою (1 шар з перекриттям в 1/4 ширини стрічки) згідно з рисунком 2.2 теплові опори виглядають таким чином (рис. 2.3):

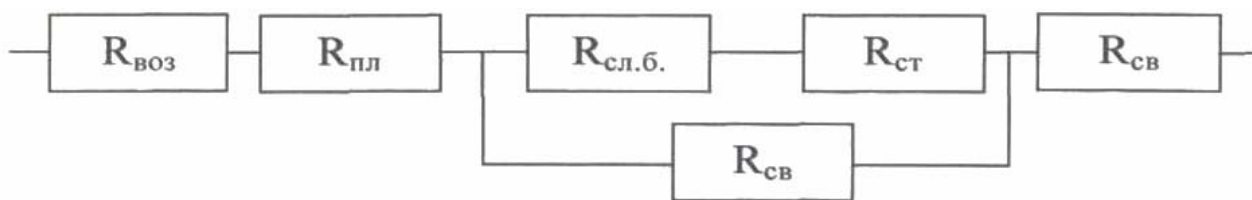


Рисунок 2.3 – Схема теплових опорів виткової ізоляції з просоченою склослюдинітовою стрічкою:

$R_{\text{воз}}$  – тепловий опір повітря;  $R_{\text{пл}}$  – тепловий опір плівки;  $R_{\text{сл.б}}$  – тепловий опір слядяного паперу;  $R_{\text{ст}}$  – тепловий опір склотканини;  $R_{\text{св}}$  – тепловий опір просочувального складу

Розрахунковий тепловий опір виткової ізоляції аналогічно електричному розраховується по формулі:

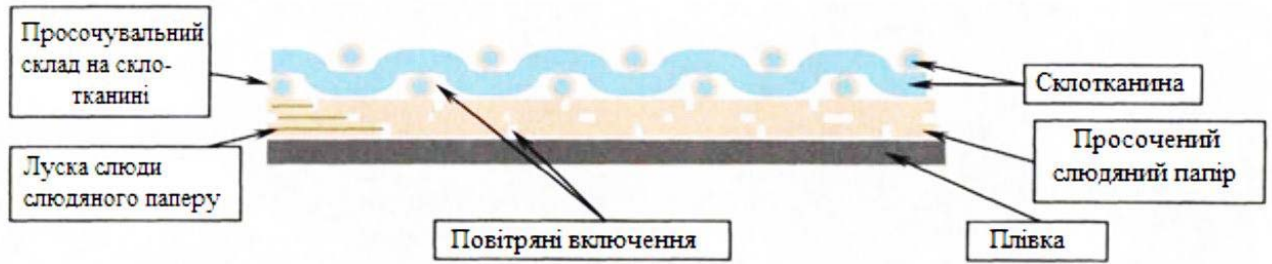
$$R_{\text{вит}} = R_{\text{воз}} + \left( R_{\text{пл}} + \frac{(R_{\text{сл.б}} + R_{\text{ст}}) \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) \quad (2.1)$$

У дужках вказаний тепловий опір склослюдинітової стрічки без урахування можливих повітряних включень. При детальному розгляді конструкції склослюдинітової стрічки окрім основних компонентів, що входять в неї, між шарами знаходиться незначна кількість повітря. Проте навіть мала кількість повітря впливатиме на багато характеристик ізоляції (і виткової, і корпусної). Значно погіршуються теплопровідні властивості ізоляції, знижується електрична міцність. На рисунку 2.4 зображена детальна схема склослюдинітової стрічки.

На рисунку 2.5 представлена схема теплових опорів для склослюдинітової стрічки без урахування повітряних включень між плівкою і провідником.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.160133.000.04MP.ПЗ



Рисунку 2.4 – Схематичне зображення компонентів, що входять в склослюдінітову стрічку

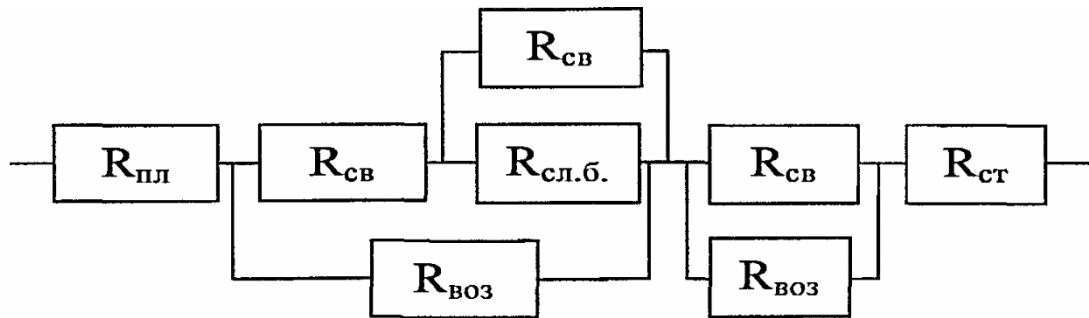


Рисунок 2.5 – Схема теплових опорів виткової ізоляції з просоченою склослюдінітовою стрічкою без повітряних включень між провідником і плівкою

Розрахунковий опір склослюдінітової стрічки з урахуванням повітряних включень буде наступним:

$$R_{\text{лент}} = R_{\text{пл}} + \frac{\left( \frac{R_{\text{сл.б}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) \cdot R_{\text{воз}}}{\frac{R_{\text{сл.б}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} + R_{\text{воз}}} + \frac{R_{\text{воз}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}}} + \frac{R_{\text{ст}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}} \quad (2.2)$$

Розрахунковий опір виткової ізоляції з урахуванням повітряного прошарку між провідником і склослюдінітовою стрічкою має вигляд:

$$R_{\text{вит}} = R_{\text{воз}} + R_{\text{пл}} + \frac{\left( \frac{R_{\text{сл.б}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) \cdot R_{\text{воз}}}{\frac{R_{\text{сл.б}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} + R_{\text{воз}}} + \frac{R_{\text{воз}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}}} + \frac{R_{\text{ст}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}} \quad (2.3)$$

З приведених схем і формул видно, що наявність повітря усередині склослюдинітової стрічки і виткової ізоляції значно збільшує тепловий опір останньої, тобто погіршує теплопровідність від провідника до корпусної ізоляції. Корпусна ізоляція у свою чергу забезпечує теплопередачу аналогічно теплопередачі у виткової ізоляції, виготовленій способом, описаним вище. Процеси теплопередачі в корпусній ізоляції, що проходять при діючих технологіях виготовлення і ремонту тягових електродвигунів, будуть розглянуті нижче детальніше.

Для зниження теплового опору виткової ізоляції, повітряних включень, що негативно впливають на її характеристики, пропонується застосовувати ізольований обмотувальний дріт. Застосування обмотувального дроту дає ряд переваг перед неізольованим провідником. По-перше, виключається ручне ізолювання склослюдинітової стрічки кожного витка секції. По-друге, зменшується кількість елементів, що входять у виткову ізоляцію без погіршення її електрофізичних властивостей. Тобто можливе зменшення товщини ізоляції. По-третє, зменшення числа елементів, що входять у виткову ізоляцію, може знижувати її тепловий опір і тим самим покращується теплопровідність. Для наочності на рисунку 2.6 схематично покажемо розташування кожного матеріалу на провіднику.

Як вже описувалося вище, наявність повітря усередині ізоляції негативно позначається на багатьох її характеристиках. За ідеальних умов, без повітря, тепловий опір виткової ізоляції (рис. 2.6) розраховується по формулі:

$$R_{\text{ВИТ}} = R_{\text{ЭМ}} + R_{\text{СТ}} + R_{\text{СВ}} \quad (2.4)$$

Розрахункова формула для теплового опору виткової ізоляції з урахуванням повітря має вигляд:

$$R_{\text{ВИТ}} = R_{\text{ЭМ}} + \frac{R_{\text{ВОЗ}} \cdot (R_{\text{СВ}} + R_{\text{СТ}})}{R_{\text{ВОЗ}} + R_{\text{СВ}} + R_{\text{СТ}}} + R_{\text{СВ}} \quad (2.5)$$

						0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



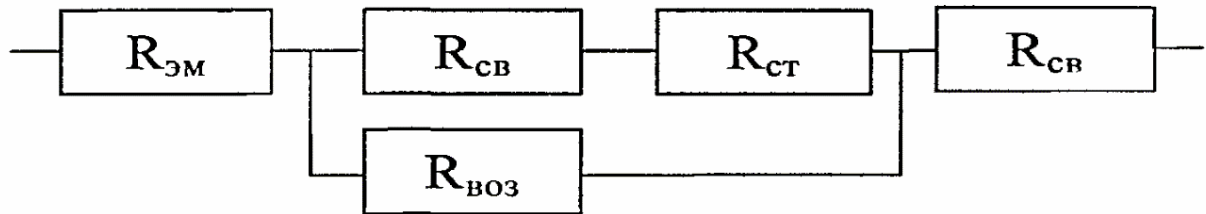


Рисунок 2.8 – Схема теплових опорів виткової ізоляції готового обмотувального дроту з урахуванням повітряних включень

Насправді на теплові і електрофізичні характеристики виткової ізоляції впливає не лише повітря, але і безліч інших чинників: вживані матеріали, технологія виготовлення, якість готової ізоляції і багато що інше. Усі вище перелічені чинники значно можуть знижувати електричні і теплофізичні властивості виткової ізоляції.

## 2.2 Розрахункова схема теплового опору корпусної ізоляції

Корпусна ізоляція тягового електродвигуна складається з декількох шарів, нанесених з перекриттям в 1/4 ширину просоченої склослюдинітової стрічки і одного шару покривної ізоляції (склострічка ЛЕС).

Відповідно до рисунка 2.4, припускаючи відсутність повітряного прошарку між плівкою і провідником, розрахунковий тепловий опір одного шару склослюдинітової стрічки з урахуванням повітряних включень усередині неї буде наступний:

$$R_{\text{лент}} = R_{\text{пл}} + \frac{\left( \frac{R_{\text{сл.б}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) \cdot R_{\text{воз}}}{\frac{R_{\text{сл.б}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} + R_{\text{воз}}} + \frac{R_{\text{воз}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}}} + \frac{R_{\text{ст}} \cdot R_{\text{св}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}} \quad (2.6)$$

Розрахунковий опір усієї корпусної ізоляції має наступний вигляд:

						0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$R_{\text{корп}} = \sum_{n=2}^1 R_{i \text{ ленты}} + R_{\text{ст}}, \quad (2.7)$$

де,  $R_{\text{корп}}$  – тепловий опір корпусної ізоляції;

$R_{i \text{ ленты}}$  – тепловий опір і-ого шару склослюдінітової стрічки;

$R_{\text{ст}}$  – тепловий опір склострічки.

З урахуванням теплового опору повітря між шарами склослюдінітової стрічки (формула 2.5 для розрахунку теплового опору) корпусної ізоляції прийме наступний вигляд:

$$R_{\text{корп}} = \sum_{n=2}^1 \left( \frac{R_{i \text{ ленты}} \cdot R_{i-1 \text{ воз}}}{R_{i \text{ ленты}} + R_{i-1 \text{ воз}}} \right) + R_{\text{ст}}, \quad (2.8)$$

де,  $R_{i-1 \text{ воз}}$  – тепловий опір повітря між шарами склослюдінітової стрічки.

### 2.3 Розрахункова схема теплового опору в пазовій ізоляції

Як правило, пазова ізоляція складається з одного шару композиційного листового матеріалу (пресована композиція, що складається з плівки і склотканини). Схема теплових опорів пазової ізоляції (вистилання паза) виглядає таким чином (рис. 2.9):

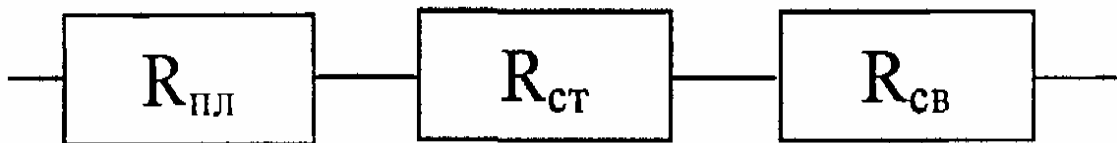


Рисунок 2.9 – Схема теплових опорів пазової ізоляції:

$R_{\text{пл}}$  – тепловий опір полімерної плівки;  $R_{\text{ст}}$  – тепловий опір склотканини;  $R_{\text{св}}$  – тепловий опір просочувального складу (яким просякнута склотканина)

											Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ						

Так само, як і раніше, розглядаючи ідеальний матеріал (без урахування повітряних включень), тепловий опір пазової ізоляції розраховуватиметься по формулі:

$$R_{\text{паз}} = R_{\text{пл}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{св}} \quad (2.9)$$

З урахуванням повітряних включень теплова схема пазової ізоляції аналогічна тепловій схемі виткової ізоляції із заміною теплового опору емалі на тепловий опір плівки . В цьому випадку розрахунковий опір пазової ізоляції матиме вигляд:

$$R_{\text{паз}} = R_{\text{пл}} + \frac{R_{\text{воз}} \cdot (R_{\text{св}} + R_{\text{ст}})}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}} + R_{\text{ст}}} + R_{\text{св}} \quad (2.10)$$

Наявністю повітря в усіх розглянутих типах ізоляції нехтувати не можна, оскільки тепловий опір повітря у декілька разів більше теплового опору органічного матеріалу і на декілька порядків більше цього параметра для неорганічних матеріалів. Таким чином, загальний тепловий опір електричної ізоляції від провідника до стінки паза з урахуванням усіх повітряних включень і прошарків згідно з рисунком 2.1 може досягати досить великих значень. Для зниження цієї величини в електричній ізоляції необхідно виключити усі повітряні включення, що входять в неї, тобто зробити ізоляцію монолітною.

#### **2.4. Дослідження теплопровідності і компонентів, що входять в електроізоляційний матеріал і систему електричної ізоляції**

На прикладі просоченої склослюдінітової стрічки, що входить в корпусну ізоляцію, оцінимо теплопровідність складної композиції, визначимо коефіцієнти теплопровідності кожного компонента (склотканина, слюдяний папір, полімерна плівка і просочувальний компаунд). Дослідження проводилися на вимірнику теплопровідності "ІТ-л - 400" в діапазоні температур від 0 до 225°C. Зразки для визначення теплопровідності готувалися згідно з методикою, представленою в

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ				

описі на вимірника, і мали діаметр 15 мм. Товщина зразків при визначенні теплопровідкомпонента змінювалася залежно від товщини досліджуваного матеріалу – від 20 до 100 мкм. Зразок з компаунда відливався в спеціальну круглу форму, оброблену антиадгезійним складом. Після термообробки зразок з компаунда піддавався шліфуванню з обох боків зі збереженням паралельності робочих поверхонь, що забезпечують максимальний контакт (без повітряного проміжку) з нагрівачем і тепломіром. Зразки, що складаються з двох і більше компонентів, мали товщину 0,5 мм і набиралися так, щоб їх товщина наближалася до товщини на сторону корпусної ізоляції вузла тягового електродвигуна (якірної котушки, котушки магнітної системи). Чергування шарів компонентів ізоляції також відповідало конструкції ізоляції вузлів тягового електродвигуна наприклад: полімерна плівка + слюдинітовий папір + склотканина n слоїв з подальшим просоченням в компаунді. Вимір теплопровідності полягає в наступному:

- 1) підготовлений зразок поміщається у вимірювальний осередок на нагрівач згори на зразок встановлюється тепломір;
- 2) швидкість і нагрів нагрівача задається за допомогою регулятора температури;
- 3) досягши необхідної температури фіксуються показання приладу в мкВ (нагрівача і тепломіра);
- 4) свідчення фіксуються за допомогою термопар, розташованих усередині вимірювального осередку, контактуючих з нагрівачем і тепломіром;
- 5) обробка результатів проводилася згідно з формулами, приведеними в описі.

На рисунку 2.10 представлені залежності коефіцієнтів теплопровідності від температури кожного компонента, що входить в просочену склослюдинітову стрічку. Як видно, усі залежності мають вигляд лінійного закону. Найбільшою теплопровідністю з компонентів, що входять, в просочену склослюдинітову стрічку володіє компаунд Елпласт-180ІД. Низька теплопровідність склотканини і слюдяного паперу в чистому вигляді була розглянута в першій главі і пояснювалася наявністю більшої кількості повітря. Для зниження кількості повітря в пористому компоненті ізоляції, а отже,

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ				

збільшення його теплопровідності, необхідно цей компонент зробити монолітнішим. На машинобудівних і ремонтних підприємствах для заповнення порожнеч застосовують просочувальні склади. На рисунку 2.11 представлені залежності теплопровідності від температури шлюдяного паперу, просоченого компаундом Елпласт-180ІД, з подальшим підпресовуванням (умовним тиском Р) і у вільному стані порівняно з непросоченим шлюдяним папером. З отриманих даних видно, що теплопровідність шлюдяного паперу, просоченого компаундом Елпласт-180ІД, дещо збільшується, але наявність повітря між шарами паперу негативно позначається на значенні коефіцієнту теплопровідності композиції.

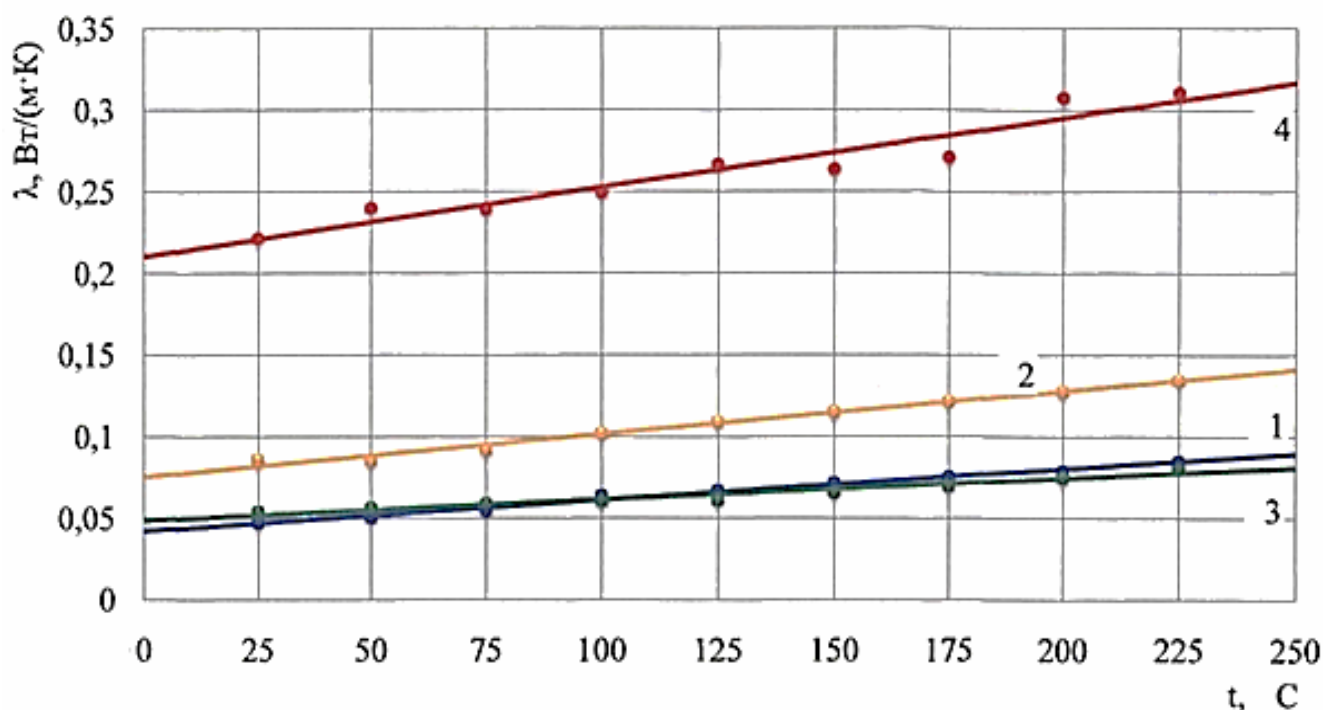


Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури компонентів, що входять в просочену шлюдяношлюдянітову стрічку:

1 – шлюдянина не просочена; 2 – поліамідна плівка; 3 – шлюдяний папір не просочений; 4 – полімеризований компаунд Елпласт – 180ІД

Більший ефект по збільшенню теплопровідності виходить у спресованій композиції з деяким зусиллям Р. Аналогічні дослідження були проведені на шлюдянині, вживаній в шлюдяношлюдянітовій стрічці. Отримані залежності представлені на рисунку 2.12. З представлених даних також видно значне збільшення теплопровідності просоченої і спресованій шлюдянини. Збільшення теплопровідності відбувається за рахунок заповнення пористої структури

склотканини просочувальним складом, в нашому випадку компаундом Елпласт-180ІД.

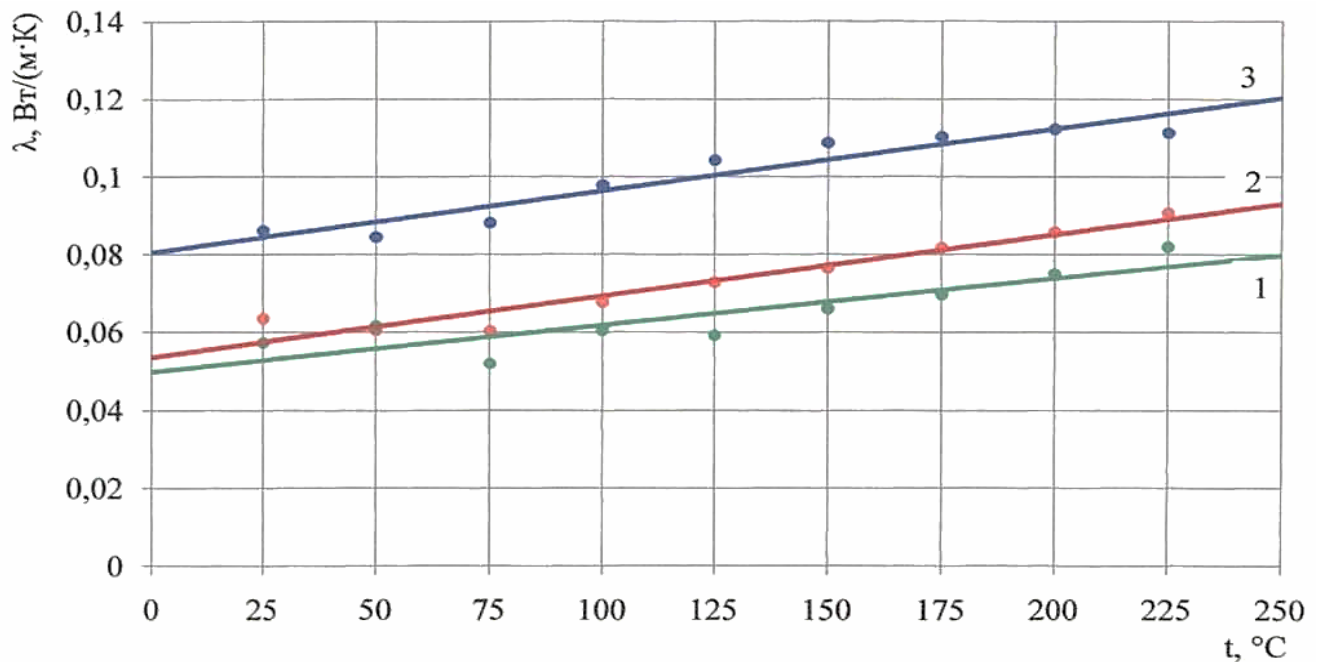


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури слюдяного паперу:

1 – не просочена; 2 – просочена просочувальним компаундом Елпласт-180ІД та не пресована; 3 – просочена просочувальним компаундом Елпласт-180ІД та підпресована умовним тиском Р

Порівнюючи залежності 3 і 2 (рис. 2.11 та 2.12 відповідно) видно, що при більш високих температурах (100-250°C) теплопровідність просоченої склотканини вище за теплопровідність просоченого слюдяного паперу за рахунок більш високого коефіцієнту теплопровідності чистого скла, вживаного для виготовлення скловолкна. При температурах до 100°C теплопровідність композиції, що складається із слюдяного паперу, має більш високі значення порівняно з композицією із склотканиною.

Наочніше для порівняння зміни коефіцієнтів теплопровідності просочених і непросочених матеріалів від температури представлені на рисунку 2.13.

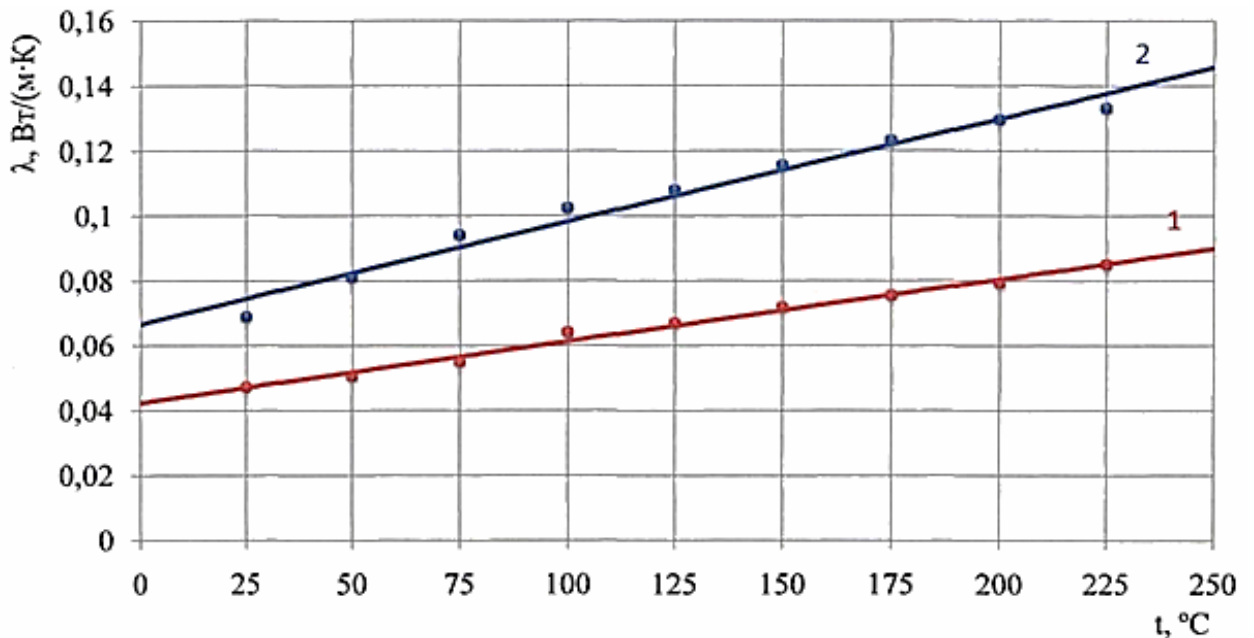


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури склотканини:

1 – не просочена; 2 – просочена просочувальним компаундом Елпласт-180ІД та підпресована умовним тиском Р

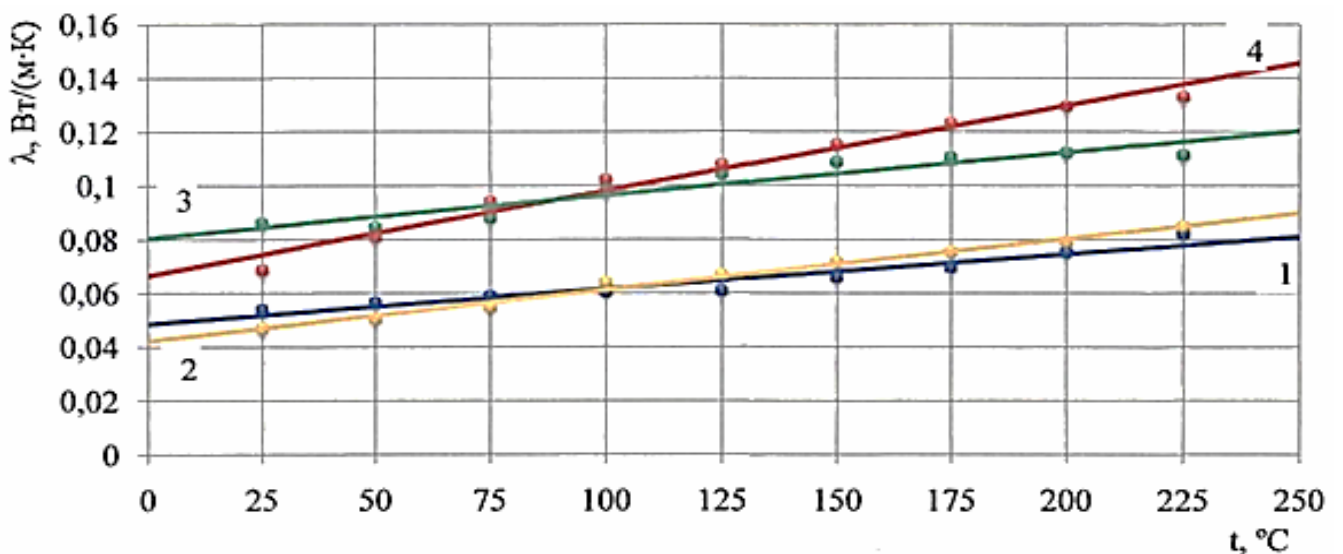


Рисунок 2.13 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури просочених та не просочених у компаунді Елпласт-180ІД з наступним опресуванням композицією:

1 – не просочений слюдяний папір; 2 – не просочена склотканина; 3 – просочений та підпресований умовним тиском Р слюдяний папір; 4 – просочена та підпресована умовним тиском Р склотканина





теплопровідності пресованого матеріалу. На рисунку 2.16 представлений характер зміни теплопровідності склотканини (від температури) залежно від технологічної дії на її структуру після просочення, наявність повітряних прошарків.

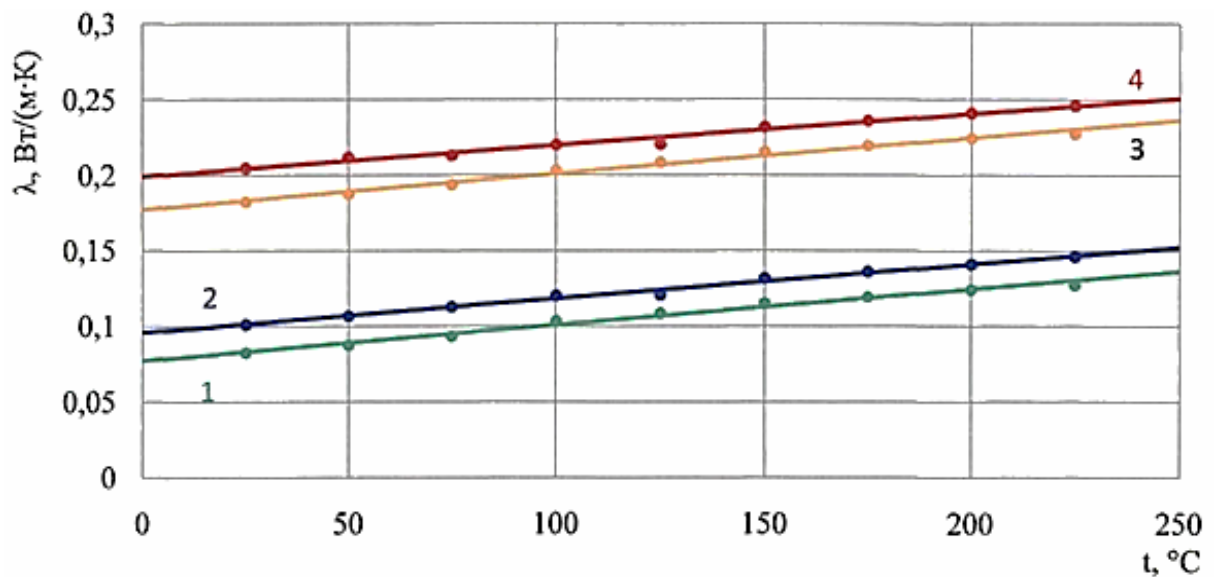


Рисунок 2.15 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури композиції, просочених різними способами компаундом Елпласт-180ІД:

- 1 – склотканина + слюдяний папір, просочені методом зануренням з підпресуванням умовним тиском Р;
- 2 – склотканина + слюдяний папір + поліамідна плівка, просочені зануренням з підпресуванням з умовним тиском Р;
- 3 – склотканина + слюдяний папір, просочені по технології VPI;
- 4 – склотканина + слюдяний папір + поліамідна плівка, просочені по технології VPI

Матеріал, отриманий пресуванням великим питомим тиском, має найвищий коефіцієнт теплопровідності. Такі значення виходять за рахунок дії високого тиску на матеріал. Відбувається зменшення відстані між волокнами склотканини, а отже, покращується теплопередача між ними. Для отримання монолітнішої системи електричної ізоляції і збільшення її теплопровідності необхідно поєднати дві технології в одну – технологію вакуум-нагнітального просочення (VPI) системи (чи матеріалу) з подальшим пресуванням високим тиском. На сьогодні для виготовлення системи електричної ізоляції тягового електродвигуна можливе застосування тільки технології VPI із-за складності конструкції вузлів.

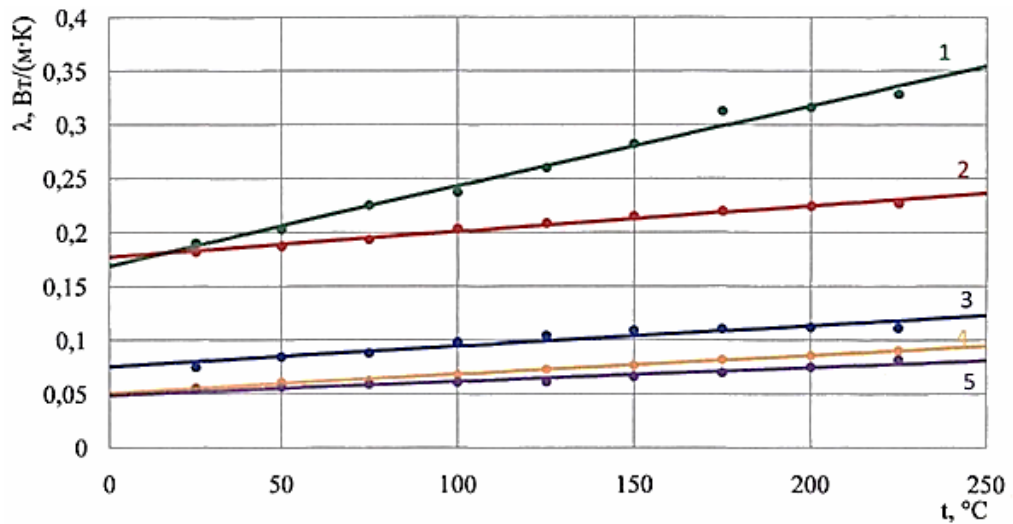


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури склотканини просоченої та пресованої різними способами:

1 – пресована склотканина умовним тиском 10 одиниць; 2 – просочена склотканина за технологією VPI; 3 – пресована склотканина умовним тиском 1 одиниця; 4 – просочена і непресована склотканина; 5 – непресочена склотканина

На рисунку 2.17 представлені залежності теплопровідності скломікаленти ЛМК-ТТ з просоченням зануренням в кремнійорганічний лак КО-916 і склослюдінітової стрічки Елізтерм-180ТТ з подальшим просоченням в компаунді Елпласт-180ІД (зануренням і методом вакуум-нагнітального просочення).

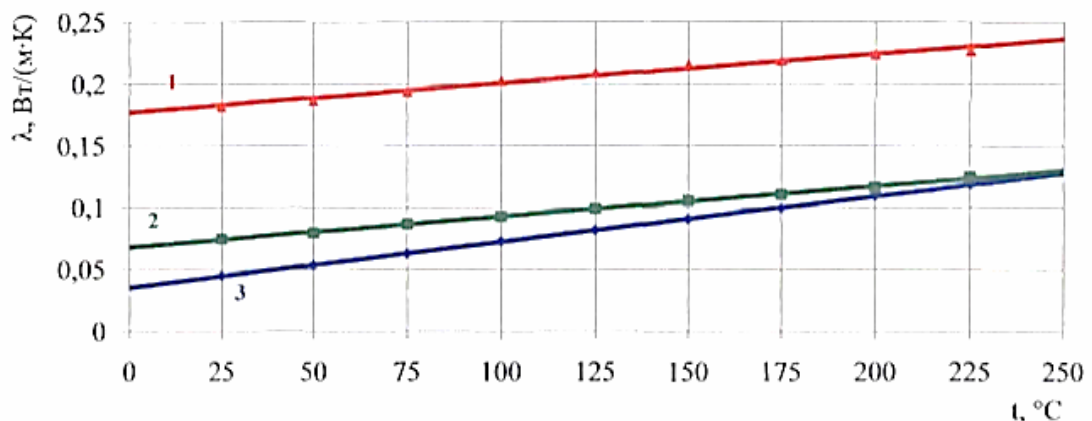


Рисунок 2.17 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури композицій, отриманих зануренням і по технології VPI:

1 – з використанням стрічки Елізтерм – 180ТТ, просоченої компаундом Елпласт-180ІД по технології VPI; 2 – з використанням стрічки Елізтерм – 180ТТ, просоченої компаундом Елпласт-180ІД методом занурення; 3 – з використанням скломікаленти ЛМК-ТТ, просоченої лаком КО-916 методом занурення



### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Для проведення більш якісного просочення вузлів тягового електродвигуна і отримання високих властивостей системи електричної ізоляції необхідно підібрати просочувальні склади, які мають високі електричні характеристики і технологічність. В роботі технологічність просочувального складу визначалася за такими показниками, як висока проникаюча здатність у внутрішні шари і міграція всередині ізоляції при температурах просочення не більше 50°C, короткий час желатинізації, можливість застосування в якості просочувального складу для композиційних матеріалів, що входять в систему електричної ізоляції, що забезпечить повну сумісність матеріалів між собою і скорочення режимів термообробки. В Україні до 2000 року в якості просочувального складу найчастіше застосовувався компаунд ПК-11, а також його модифікації. Для більшості просочених склослюдінітових стрічок в якості просочувального складу застосовують лаки на основі епоксидної смоли. При використанні складів на основі епоксидної смоли мають місце такі недоліки (пов'язані з технологічністю):

- великий час желатинізації, отже, тривалість режимів термообробки 24 години і більше;
- виділення летючих зі стрічок при термообробці вузлів тягового електродвигуна, і, як наслідок, відсутність монолітності, і низькі електрофізичні властивості ізоляції;
- при проведенні ремонту електричної машини потрібні великі енергетичні витрати (практично не ремонтпридатна електрична ізоляція).

Крім того, просочувальні склади на основі епоксидної смоли можуть використовуватися тільки на клас нагрівостійкості F. У таблиці 3.1 представлені технічні характеристики просочувальних складів нового покоління на основі олігоефірімідів типу "Елпласт", що випускаються ЗАТ "Електроізол".

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.160133.000.04MP.ПЗ

Таблиця 3.1 – Основні характеристики просочувальних компаундів Елпласт

Найменування показника	155ІД	180ІД	220ІД
Електрична міцність, МВ/м, не менше (диски товщиною 1 мм)	22	25	22
Питомий об'ємний опір, Ом·м, не менше	$10^{12}$	$10^{13}$	$5 \cdot 10^{12}$
Умовна в'язкість, с, (по ВЗ-246 з діаметром сопла 4 мм)	40-100	30-80 (при 50°C)	$\leq 60$ (при 50°C)
Час желатинізації, хв., не менше	20	10	10
Цементуюча здатність, Н, не менше	300	392	250

Компаунди мають низьку в'язкість, що дозволяє проводити просочення вузлів тягового електродвигуна при температурах менше 50°C. Всі компаунди мають дуже короткий час желатинізації. Під час термообробки витікання компаунда з внутрішніх шарів ізоляції мінімальне, що забезпечує максимальну монолітність ізоляції. Цементуюча здатність компаундів вище значень просочувальних лаків, але нижче значень для компаундів на основі епоксидних смол, що дозволяє проводити ремонт електричної машини без великих енергетичних витрат.

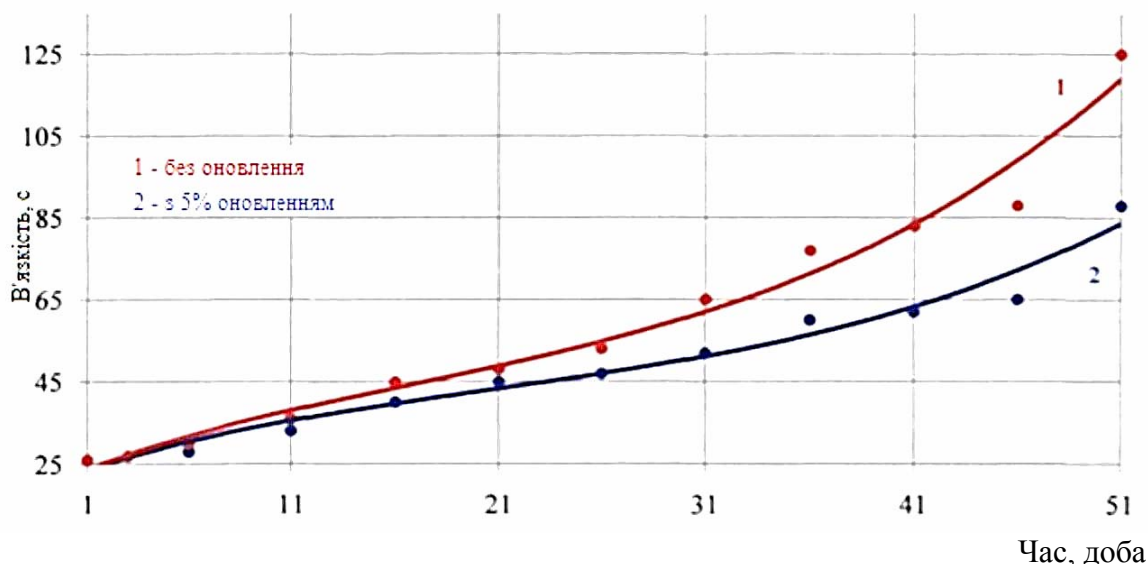


Рисунок 3.1 – Залежність в'язкості компаунда Елпласт-180ІД від часу зберігання при 50°C (по віскозиметру ВЗ-246, діаметр сопла 4 мм)

З представлених даних видно, що навіть без поновлення компаунда робоча в'язкість зберігається протягом місяця.

### 3.1. Дослідження плинності просочувального складу в просочених склослюдинітових стрічках.

Для забезпечення повної (хімічної та технологічної) сумісності просочених слюдинітових стрічок з просочувальним компаундом необхідно застосовувати при виготовленні стрічок той же просочувальний склад або склад на його основі, в якому буде проводитися подальше просочення вузлів електричної машини. Розроблено просочення склослюдинітової стрічки Елізтерм на основі просочувальних компаундів Елпласт, зокрема стрічки Елізтерм-180ТПМ і Елізтерм-180ТТ. Як просочувальний складу використовується компаунд Елпласт-180ІД. Отримані стрічки більш технологічні, еластичніші і мають термін зберігання не менше 1 року. У зв'язку з тим, що в'язкість компаунда досить низька при температурі просочення, була вивчена плинність сполучного в просоченій склослюдинітовій стрічці Елізтерм. Дослідження проводилися в порівнянні з серійними стрічками, просоченими сполучними на основі епоксидної смоли. Плинність характеризується здатністю зв'язувати його композиції до течії та заповнення форми в умовах переробки (при пресуванні або інших видах переробки) при постійному тиску і температурі. Плинність можна визначити як процентне співвідношення маси зразка до і після впливу на нього тиску. Дослідження по визначенню плинності проводили при тисках 2 і 6 атм в залежності від часу витримки. На рисунках 3.2 і 3.3 представлені залежності плинності сполучного від часу прикладеного на зразок тиску. Випробувальний тиск при дослідженні плинності вибрано таким чином, щоб воно відповідало значенням, при яких виробляють просочення на ремонтних заводах Укрзалізниці. Більшість ремонтних заводів має устаткування для просочення, розраховане на 2 атм, і всього кілька заводів, які мають дозвіл (про роботу судин під тиском понад 2 атм.) на проведення робіт під тиском при використанні розрахованого на високий тиск просочувального устаткування.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.160133.000.04MP.ПЗ

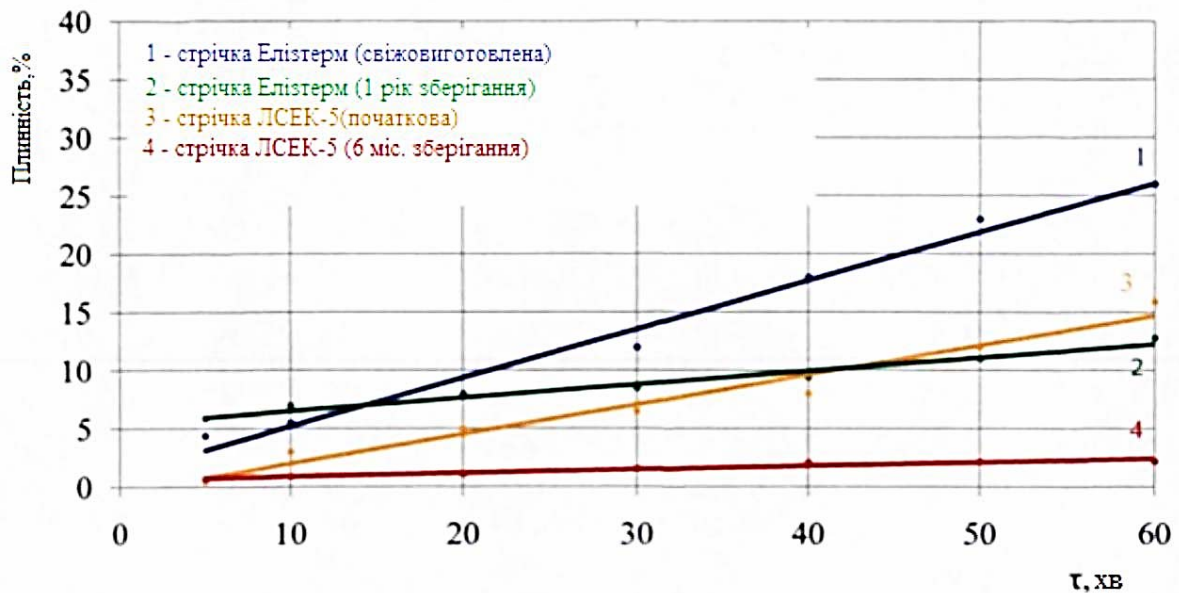


Рисунок 3.2 – Залежність плинності сполучного із просоченої слюдинітової стрічки при тиску 2 атм. і 50°C від часу опресування

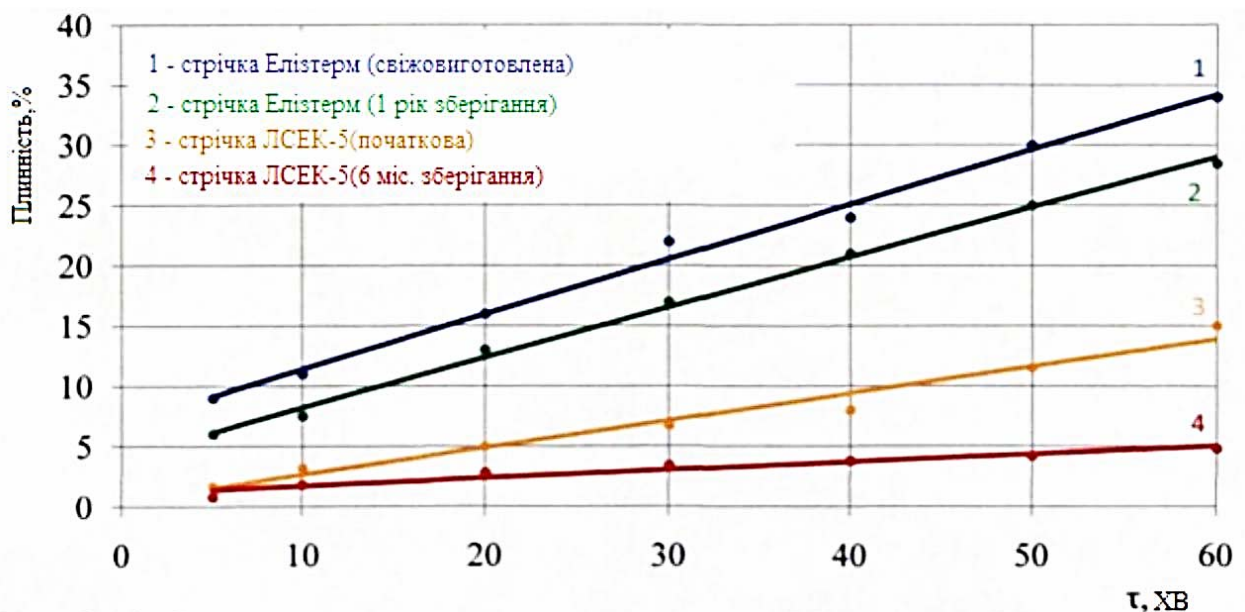


Рисунок 3.3 – Залежність плинності сполучного із просоченої слюдинітової стрічки при тиску 6 атм і 50°C від часу опресування

З представлених залежностей видно, що більшою плинністю володіє сполучна (компаунд Елпласт) склослюдинітові стрічки Елізтерм. Сполучна на основі епоксидної смоли в просочених стрічках має низьку плинність при температурі 50°C і не залежить від прикладеного тиску при пресуванні. Щодо



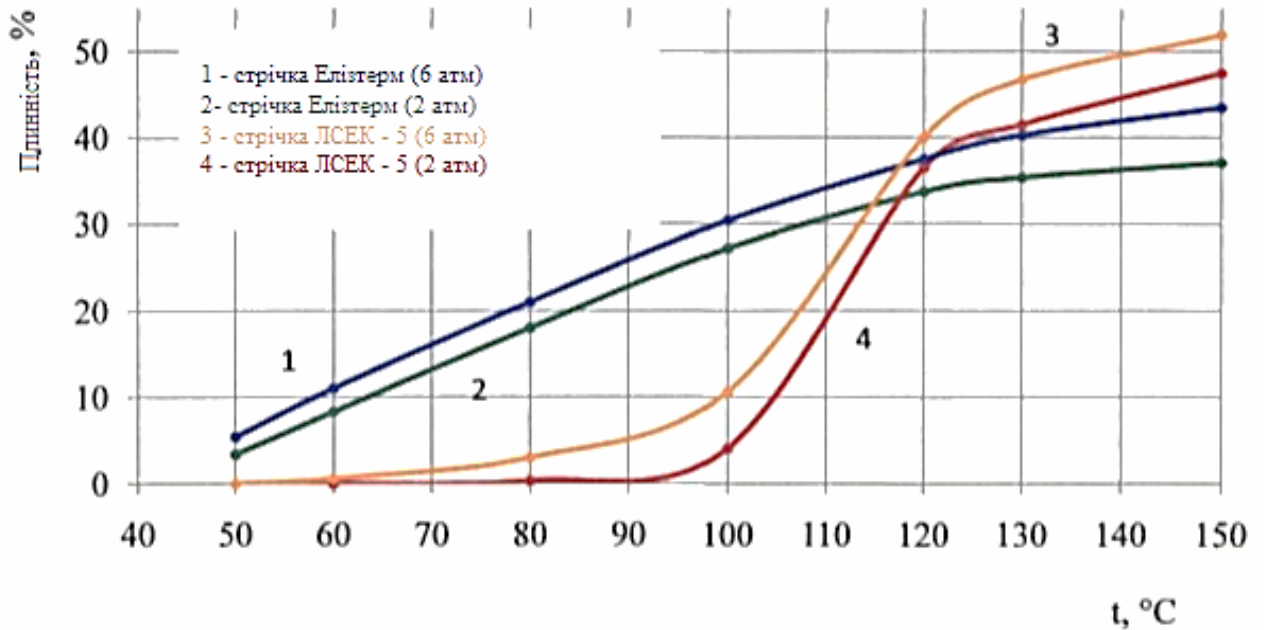


Рисунок 3.4 – Залежність плинності сполучного із просоченої слюдинітової стрічки при опресуванні протягом 5 хвилин від температури

На представленій залежності видно перевага при використанні нових просочених склослюдинітових стрічок Елізтерм на основі компаунда Елпласт-180ІД перед серійними стрічками. Перевага полягає в можливості проводити просочення вузлів тягових електродвигунів при температурах 50-70°C, що забезпечить всередині ізоляції міграцію 5-15% компаунда. При таких температурах, відповідно до залежності в'язкості від часу зберігання (рис. 3.1), використання компаунда без поновлення можливо протягом місяця (одне ремонтне підприємство Укрзалізниці в середньому ремонтує 150-200 тягових електродвигунів на місяць, витрата компаунда на один ТЕД складає 10 кг, заповнення автоклава компаундом з завантаженим якорем з перевищенням рівня просочувального складу над колектором становить близько 400 кг). Полімеризація компаунда Елпласт-180ІД починається при температурі 120-130°C, рухливість просочувального складу сповільнюється, що підтверджується залежністю, представленої на рисунку 3.4. Для забезпечення міграції такої ж кількості сполучного в серійних стрічках необхідно проводити просочення при температурі просочувального складу 95-105°C, що енергетично не вигідно і не безпечно. На залежностях на рисунку 3.4 рухливість сполучного на основі

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ				

епоксидної смоли в серійних стрічках перебуває в діапазоні температур 80-120°C. При більш високих температурах починається полімеризація просочувального складу аналогічно компаунду Елпласт. Проходження залежності плинності сполучного стрічок Елізтерм від температури нижче залежності плинності сполучного серійних стрічок пояснюється малим часом желатинізації. Згідно табл. 3.1 желатинізація компаунда Елпласт-180ІД становить не більше 10 хв, а желатинізація сполучного (компаунда) на основі епоксидної смоли становить більше 30 хв.

### 3.2. Підбір та обґрунтування технологічних режимів на підставі значень теплопровідності і плинності

Для виготовлення системи електричної ізоляції на підставі отриманих даних необхідно змінити технологічні режими: використовувати сучасні способи просочення виткової ізоляції, а температуру і тиск просочення корпусної ізоляції, що забезпечують її монолітність, прийняти такими, щоб не погіршились електричні властивості системи ізоляції. Дослідження електричних властивостей виткової ізоляції проводили на моделях (рис. 3.5), що представляють собою два провідники дроти ПЕТВСД прямокутного перетину 3,55x7,10 мм. Загальна довжина моделі склала 400 мм, а довжина пазової частини - 260 мм.

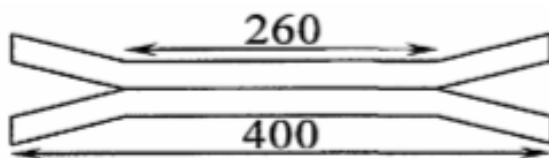


Рисунок 3.5 – Модель для визначення  $U_{пр}$  між витками

Попередньо було визначено пробивну напругу між двома непросоченими провідниками. Для стягування провідників між собою використовували липку електроізоляційну стрічку, яку накладали в розбіг. Підготовлену таким чином модель піддавали електричним випробуванням за визначенням  $U_{пр}$  між витками. У початковому стані середнє значення  $U_{пр}$  між витками за даними десяти

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ					

випробувань склало 8,5 кВ. На ряді ремонтних заводів Укрзалізниці для того, щоб якірна секція "не руйнувалась" під час ізолювання, її просочують методом занурення в лак (як правило це просочувальні лаки класу нагрівостійкості В: ФЛ-98, МЛ-92 і ГФ-95), надають певну форму і підсушують в печі протягом 2 годин при 100-110°C, після чого ізолюють. Додаткове просочення збільшує  $U_{пр}$  між витками. На рисунку 3.6 представлено розподіл пробивної напруги між витками дроту ПЕТВСД, просоченого компаундом Елпласт (на заміну раніше застосованих просочувальних лаків) дротів ПЕТВСД в порівнянні з непросоченими.

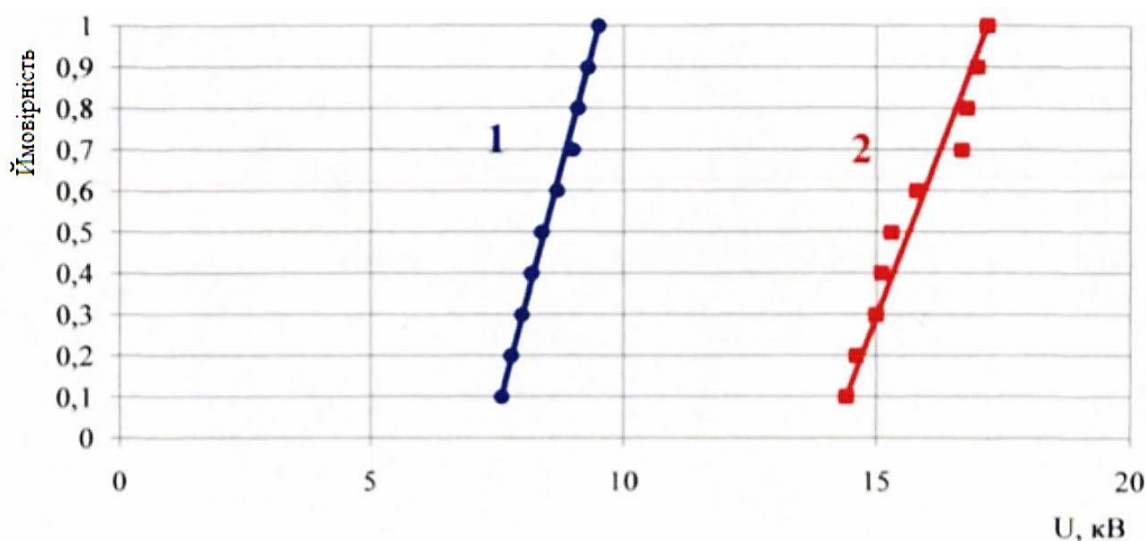


Рисунок 3.6 – Розподілення пробивної напруги між витками дроту ПЕТВСД:  
1 – не просочений дріт; 2 – дріт, просочений компаундом Елпласт

В результаті досліджень виявлено, що додаткове просочення збільшує  $U_{пр}$  майже в 2 рази в порівнянні з відповідними значеннями для непросоченого дроту. Перед випробуванням моделі, її термообробляли протягом 6 годин при 160°C. Середнє значення  $U_{пр}$  між витками за даними десяти випробувань склало 16 кВ. Після визначення  $U_{пр}$  з просоченої і непросоченої моделей була витягнута ізоляція для визначення кількості вмісту зв'язуючого в ній. До просочення зміст сполучного становило 26% (емаль-лак і просочувальний склад скловолкна), після просочення зміст сполучного збільшилася до 36%. Визначення змісту

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

0032.160133.000.04MP.ПЗ

сполучного проводили методом відпалу і подальшого зважування випробовуваних зразків. Але при такому методі просочення зануренням зменшується час сушіння якірної секції і є зайвими технологічними операціями і подовжують процес ремонту тягового електродвигуна.

У розробленій технології просочення вузлів тягового електродвигуна і ремонту в цілому пропонується застосовувати в якості корпусної ізоляції попередньо просочені склослюдинітові стрічки Елізтерм-18ОТПМ. Просочення даних стрічок виконується просочувальним компаундом Елпласт-18ОІД, який володіє низькою в'язкістю і доброю плинністю в стрічках при температурах 50-70°C. На підставі отриманих результатів по визначенню плинності просочення ізольованих і покладених в якір секцій можна проводити при температурі 50°C і тиску 6-8 атм. При цьому попередньо необхідно провести вакуумування якоря при залишковому тиску 20-100 мм рт ст для видалення повітряних включень з внутрішніх шарів корпусної ізоляції.

Зміст сполучного в попередньо просочених склослюдинітових стрічках Елізтерм-18ОІД має бути не менше 28%, що забезпечить його міграцію у внутрішніх шарах корпусної ізоляції аж до просочення виткової ізоляції. Підвищення змісту сполучного в витковій ізоляції проводу може здійснюватися в такий спосіб: після нанесення корпусної ізоляції на секцію і укладання секції в якір останній не піддається термообробці при 150°C, а тільки розігрівається до 60-70°C і просочується за технологією вакуумнагнітаючого просочення.

Тиск (6-8 атм) при вакуумнагнітаючому просоченні впливає на просочувальний компаунд, який, в свою чергу, обжимає корпусну ізоляцію як при гідростатичному опресуванні, що змушує сполучна, що знаходиться в стрічці, переміщатися в виткових ізоляціях проводу. Просочений таким способом якір піддається остаточній термообробки по режиму, зазначеного в технічних умовах на просочувальний склад. Проведено відповідні випробування на моделі, представленої на рисунку 3.7.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

0032.160133.000.04МР.ПЗ



теплопровідність виткової ізоляції зростає від 0,07 до 0,14 Вт/мк в тому ж температурному діапазоні. Для підбору оптимального режиму термообробки просочених вузлів тягових електродвигунів в компаунді Елпласт180ІД були отримані криві полімеризації або вміст гель-фракції в залежності від часу термообробки. Дослідження проведені з використанням просоченої склослюдинітової стрічки Елізтерм-180-ТПМ. На рисунку 3.8 представлені залежності отриманої гель-фракції від часу при різних температурах - 160°C, 180°C і при ступінчастому нагріванні. Ступінчастий нагрів є самим "м'яким" режимом термообробки, що виключає внутрішні перенапруги компаунда. Але в умовах виробництва такий режим витримати неможливо через габарити просочених вузлів тягового електродвигуна. У зв'язку з цим оптимальним режимом термообробки слід прийняти режим при температурі 180°C протягом 10 годин.

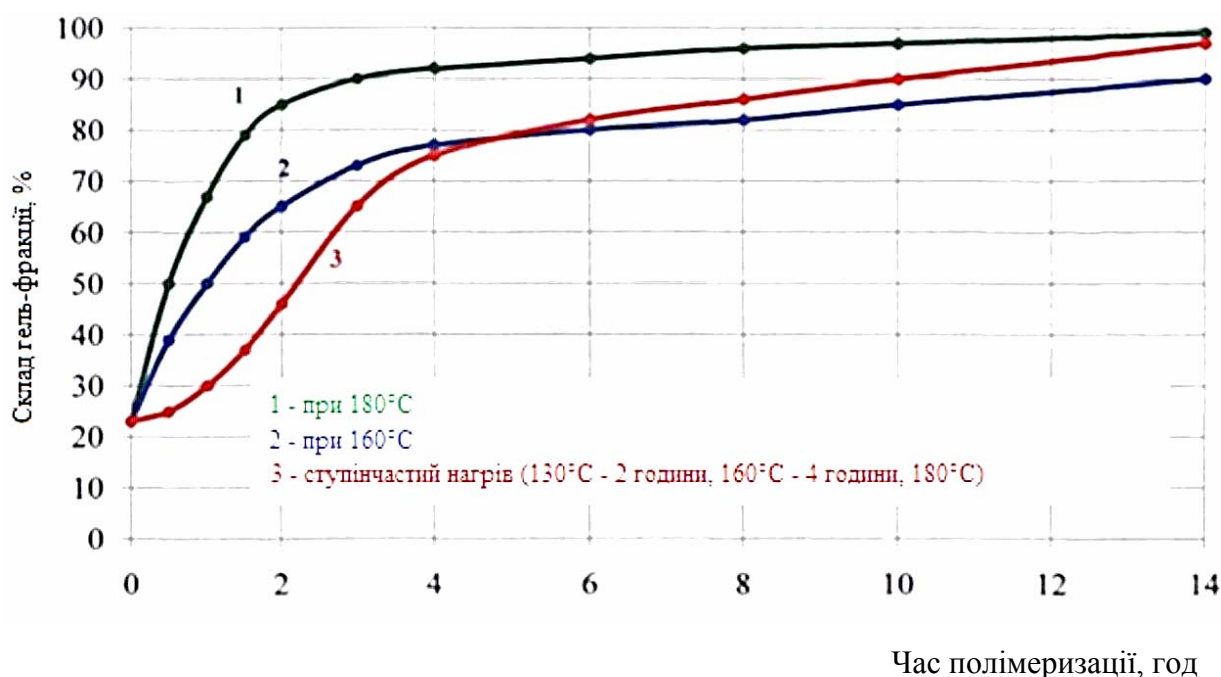


Рисунок 3.8 – Криві полімеризації (зміст гель-фракції) компаунда Елпласт-180ІД при різних умовах отвердіння

Тут при термообробці протягом 10 годин гель-фракція становить понад 95%, що забезпечує монолітність системи електричної ізоляції, її стабільні і високі електричні властивості. На рисунку 3.9 представлена діаграма просочення і

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ				



Випробування з тривалою витримкою під напругою можна проводити тільки після просочення і термообробки ізоляції, при цьому зниження ресурсу ізоляції не відбувається.

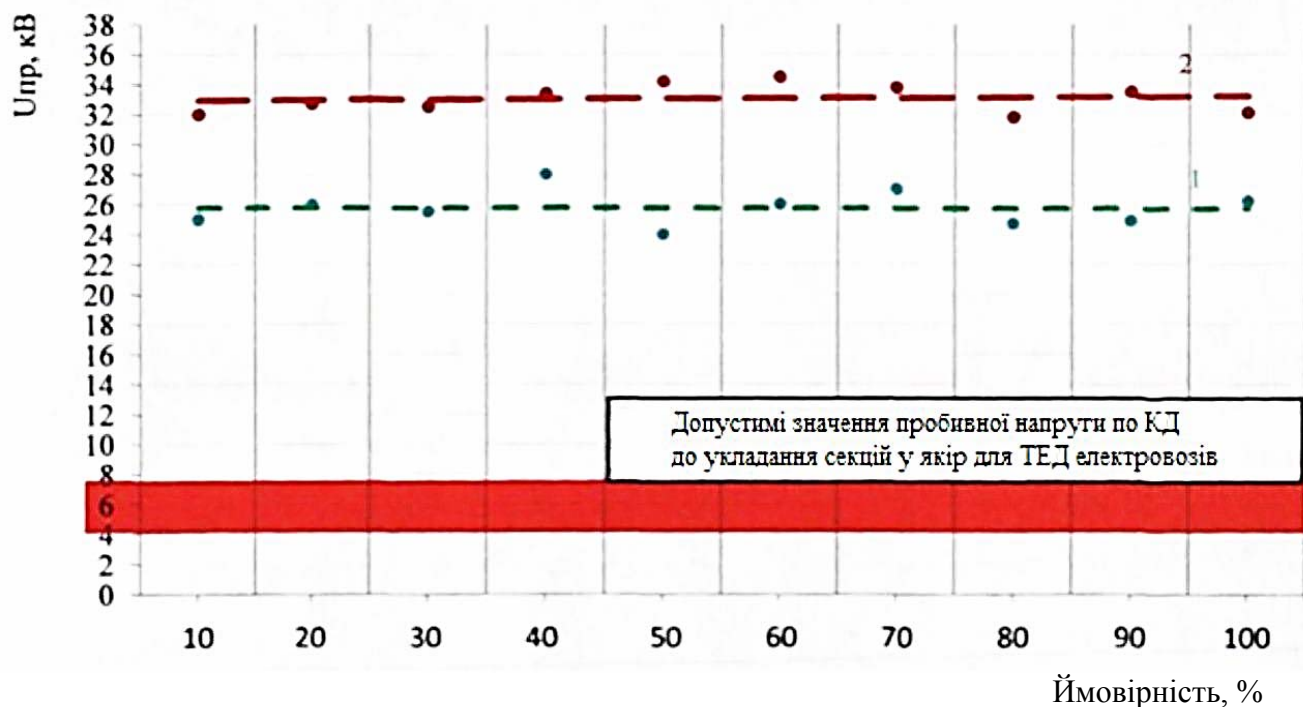


Рисунок 3.10 – Розподілення пробивної напруги  
1 – не опресованої; 2 – опресованої

**Висновки до розділу.** Новий просочувальний компаунд Елпласт-180ІД, який використовується в нових просочених склослюдінітових стрічках Елізтерм-180-ТІМ, володіє достатньою плинністю при більш низьких температурах, що дозволяє виробляти просочення виткової ізоляції і заповнення пустот всередині корпусної ізоляції, забезпечуючи монолітність корпусної ізоляції з мінімальною кількістю повітряних включень. Просочення виткової ізоляції проводиться спільно з корпусною, що скорочує кількість технологічних операцій при ремонті тягового електродвигуна і покращує його електричні характеристики.

На підставі отриманих даних визначено оптимальні технологічні режими просочування і термообробки систем електричної ізоляції вузлів тягових електродвигунів на ремонтних підприємствах Росії, при яких досягаються найкращі теплові і електричні властивості електричної ізоляції. За рахунок

						0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

застосування просочувального компаунда Елпласт180ІД і оптимізації технологічних режимів кількість просочень і час термообробки можуть скоротитися в 2,5 і більше разів в залежності від типу застосовуваного просочувального складу.

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н

### 4.1 Нові електроізоляційні матеріали для вузлів тягових електродвигунів і модернізація систем електричної ізоляції на їх основі

Для збільшення ресурсу тягового електродвигуна, його електричних і теплофізичних характеристик ЗАТ "Електроізол" розробило електроізоляційні матеріали для кожного класу нагрівостійкості. Основні матеріали, як вже було зазначено вище, мають одну хімічну основу – олігоефірімід, або просочувальні компаунди з торговою маркою Елпласт. Для повної сумісності під час просочення корпусної ізоляції склослюдинітові стрічки просочувалися компаундом Елпласт і надалі отримали назву Елізтерм. На основі компаундів Елпласт із просочених склослюдинітових стрічок Елізтерм з'явилися системи електричної ізоляції "Термоліт", для класів нагрівостійкості F, H і C. В таблиці 4.1 представлені матеріали, що входять в систему електричної ізоляції Термоліт Н для тягових електродвигунів. Залежно від можливостей технологічного обладнання ремонтного підприємства передбачено застосування матеріалів як для технології VPI, так і для технології Resin Reach. Матеріали поєднуються в композиції таким чином, щоб крім хімічної сумісності забезпечувалася і технологічна сумісність, режими термообробки мінімально відрізнялися один від одного, тобто по температурі не більше 5 градусів, а по часу не більше 2 годин.

При можливості технологічного обладнання на підприємствах, створювати розрядження в автоклаві менше 100 мм рт ст і надлишковий тиск від 6 до 8 атм можливе застосування не просочених або напів просочених склослюдинітових стрічок. Були розроблені рекомендації з проведення просочення і термообробки вузлів тягового електродвигуна при використанні в якості просочувального складу компаунда Елпласт-180ІД. Також були висунуті вимоги до технологічного обладнання для отримання монолітної і якісної ізоляції. Таким чином, для впровадження нових електроізоляційних матеріалів була розроблена

					<i>0032.160133.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модернізована система електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н і представлені рекомендації з проведення просочення і термообробки вузлів тягових електродвигунів на підставі отриманих результатів визначення плинності і теплопровідності компонентів і систем електричної ізоляції ТЕД.

Таблиця 4.1 – Система електричної ізоляції

Галузь застосування	Обмотка статора			Обмотка якоря
	котушка КП		компенсаційна котушка	
	Resin	VPI		
Виткова ізоляція				Л-ПМК-Т
Межвиткова ізоляція	Просочений композиційний матеріал Елпрег 180	1. Елпрег 180 2. Непросочений композиційний матеріал	1. Л-ПМК-Т 2. Елізтерм-180	
Корпусна ізоляція	1. ЛСЭ-ПМ 2. Елізтерм-180 3. Елпласт-180ІД	1. ЛСКН-160ТТ 2. Елпор-180 3. Елпласт-180ІД	ЛСЕ-ПМ	1. ЛСЕ-ПМ 2. Елізтерм-180 3. Елпласт-180ІД
Пазова ізоляція				Композиційні матеріали
Пазовий клин				СПП-180У СТ-ЭТФ, СТТ
Бандаж				ЛСБЭ-Н(у)
Межламельна ізоляція колектора				КИФЭ-Н
Колекторні манжети				ФФК, ФМК
Кінці, що виводять		Склотканина ЛСКЛ		
Покриття	Покривна емаль Епімаль-9114			
Конструкційні матеріали	Склотекстоліт СТ-ЭТФ, СТТ			
Заповнення пустот	Герметик електроізоляційний ПЭ-0014			

#### 4.2 Проведення циклічних випробувань системи електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н із застосуванням нових електроізоляційних матеріалів

Для підтвердження та отримання офіційного підтвердження того, що система електричної ізоляції Термоліт Н відповідає класу нагрівостійкості, в ВЕЛНПІ проведені циклічні випробування, результати яких порівнювалися з результатами для систем ізоляції на основі кремнійорганічного лаку і поліамідної плівки.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04MP.ПЗ					

Порівняльним випробуванням піддавалися матеріали, що входять в систему електричної ізоляції Термоліт Н, і система на основі поліамідної плівки і кремнійорганічного лаку. Основні дії, що входять в один цикл:

- теплове старіння протягом 96 годин при температурі  $(230 \pm 3)^\circ\text{C}$ ;
- електричне старіння під напругою 1,5 кВ протягом 8 годин;
- вплив зміни температур (термоудару) згідно ГОСТ 16.962.1-89, витримка при кожній температурі – 1 година. Мінімальна температура –  $(-50 \pm 3)^\circ\text{C}$ , максимальна –  $(+ 130 \pm 3)^\circ\text{C}$ .

Після певного циклу замірялися деякі електричні характеристики (опір ізоляції, струми витоку, пробивна напруга, зміна електричної ємності) і порівнювалися з початковими, до початку циклічних випробувань. Було показано, що всі зразки систем ізоляції мали високі значення електричної міцності в сухому та зволоженому станах. Дослідні системи мають бути рівними і однаково стійкими до впливу старіючими навантаженнями електричним впливом. За висновком ВАТ ВЕЛНІІ, компаунд Елпласт-180ІД, що входить в систему ізоляції Термоліт Н, володіє:

- життєздатністю, достатньою для серійного виробництва з періодичним оновленням;
- малим часом глеєутворення, що створює передумови мінімізації втрат просочувального складу в процесі термообробки виробу;
- система ізоляції на основі стрічки Елізтерм-180ТІМ з просоченням в компаунді Елпласт-180ІД може бути використана для перспективних асинхронних і колекторних тягових електродвигунів, в тому числі на номінальну робочу напругу 3 кВ;
- при позитивній оцінці економічної ефективності, а також при зберіганні компаунда Елпласт-180ІД при температурі понад  $35^\circ\text{C}$  протягом 10 діб з робочою в'язкістю для просочення компаунд може бути рекомендований до використання при виготовленні якорів серійних тягових електродвигунів типу НБ520.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>0032.160133.000.04MP.ПЗ</i>					

### **4.3 Розробка і перегляд нормативних документів для ремонтних підприємств Укрзалізниці для застосування нових електроізоляційних матеріалів**

Для офіційного дозволу застосування системи електричної ізоляції Термоліт Н на ремонтних заводах Укрзалізниці ПКТБл розробило технологічну інструкцію ТІ 103.11.4832007 "Технологічна інструкція на ізолювання, просочення, забарвлення і сушку електричних машин із системою ізоляції класу нагрівостійкості Н". При розробці даної інструкції фахівці ПКТБл використовували результати розробок технологічних режимів застосування того чи іншого матеріалу, отримані ЗАТ "Електроізол". Основні розділи технологічної інструкції сформульовані після проведення дослідних робіт на заводі із застосуванням нових електроізоляційних матеріалів ЗАТ "Електроізол". У зв'язку з тим, що тягові електродвигуни були розроблені до 90-х років минулого століття, то матеріали, закладені в конструкторську документацію, не переглядалися з того часу. Важливість інструкції полягає не тільки в модернізації технології ремонту ТЕД, а й в обов'язковому застосуванні сучасних матеріалів, обладнання та оснащення для ремонту систем електричної ізоляції.

### **4.4 Проведення дослідних та промислово-дослідних робіт по ремонту і виготовленню тягових електродвигунів з модернізованою системою електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н**

Вперше система електричної ізоляції була випробувана на заводі Електротяжмаш навесні 2005 року. Були відремонтовані 8 тягових електродвигунів НБ-418К6. Ізолювання, просочування та сушіння вузлів тягового електродвигуна проводилися аналогічно описаної в технологічній інструкції ТІ. Дана послідовність технологічних операцій була взята за основу для ТУ 103.11.483-2007. При проведенні досвідчених робіт технологічне обладнання заводу дозволило провести просочення вузлів тягового двигуна НБ-418к6 при надлишковому тиску понад 5 атм. У той же час бак з компаундом має водяний

						0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

обігрів, що дозволило добитися мінімальної в'язкості компаунда і тим самим глибокого його проникнення у внутрішні шари ізоляції. На відформовані з дроту ПЕТВСД зрівняльні котушки вручну наносили просочену склослюдінітову стрічку Елізтерм-180ТПМ 0,1х20. На відформовані з дроту ПЕТВСД якірні котушки вручну наносили на задні і передні лобові частини стрічку Елізтерм-180ТПМ 0,1х20 по 4 шари в півнахлесту. На пазову частину стрічку наносили на стрічкоізолюючому верстаті. Поверх основної ізоляції завдали покривну ізоляцію зі склострічки ЛЕС 0,1х20. Перед укладанням в якір всі котушки піддавалися випробуванням. Підготовлений для укладання якір ізолювали з обох сторін пазової частини полотном Елізтерм-180ТПМ 0,13х135 і Елізтерм-180ТПМ 0,13х240. Вистилання паза виробляли композиційним матеріалом Імідофлекс 292-0,17. Як міжплощинну ізоляцію застосовували склопенкослюдопласт ГИК-ЛСК (в) -0,45. Контрольні випробування напругою 7,2 кВ протягом 1 хвилини обмотки якоря витримали. Для скорочення кількості просочень перед просоченням було завдано постійний бандаж стрічкою ЛСБЕ Н(у). Кількість шарів відповідало конструкторській документації на двигун НБ418кб.

Перед просоченням якір був розігрітий до 60-70 °С, а потім завантажений в автоклав, де піддався вакуумуванню протягом 30 хв при залишковому тиску 5-10 мм рт ст. Просочення виробляли під тиском 6-8 кгс/см протягом 1 години в компаунді Елпласт-180ІД (в'язкість компаунда 25-30 с по В3-4 при температурі 35-45°С). Просочений якір містився в сушильну піч та при термообробці протягом 10 годин при 180°С, після чого прямував на контрольні випробування напругою 6,5 кВ протягом 1 хвилини. Всі виготовлені якоря випробування витримали. Так само після термообробки було визначено опір ізоляції якоря. Результати представлені в таблиці 4.2.

Виготовлення ізоляції котушок головного і додаткового полюса проводили згідно існуючій технології на заводі. Нерівність котушок перед ізолюванням вирівнювали герметиком ПЕ-0014. Ізолювання котушок виробляли за такою схемою:

						0032.160133.000.04МР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



Технологічне випробування комплексу електроізоляційних матеріалів ЗАТ "Електроізол" при капітальному ремонті тягових електродвигунів пройшло без зауважень. Доцільно для ізолювання зрівняльних обмоток застосовувати стрічки товщиною 0,08 мм.

Всі відремонтовані якоря і котушки магнітної системи пройшли контрольні випробування відповідно до технологічного процесу.

Таблиця 4.3 – Перегриви ізоляції ТЕД ТЛ-2К1 із системою класу нагрівостійкості F, отримані на випробувальній станції

в °С				
№ остова	№ якоря	$t_{\text{як}}$	$t_{\text{гп}}$	$t_{\text{як}}$
368	458	118	117	121
2839	658	124	137	124
626	258	116	118	120
5561	3497	118	117	113
10503	318	121	137	124
4850	366	124	143	131
7752	373	122	118	120
3778	887	117	122	121

Аналіз впровадження нових технологічних процесів на заводі та результат застосування матеріалів ЗАТ "Електроізоліт" показав зниження трудовитрат за рахунок одноразового просочення і накладення до просочення постійного скло бандажу, а також зниження енерговитрат. Так, процес попередньої сушки, просочення і запікання якоря НБ-514 просоченого компаундом ВЗТ-1 по техпроцесу 5ТН674183 становить понад 45 годин, процес попередньої сушки, дворазового просочення і запікання якоря НБ-418 просоченого лаком ФЛ-98 по техпроцесу 5ТН674109 становить близько 38 годин, а режими, рекомендовані ЗАТ "електроізол" складають всього 12 годин. При потужності сушильних печей майже 800 кВт/год застосування цих матеріалів забезпечує значну економію енергоресурсів. Експериментальними тяговими електродвигунами був укомплектований електровоз ВЛ80. На сьогоднішній день даний електровоз пройшов більше 500 тис км, зауважень під час експлуатації не надходило. На

					0032.160133.000.04MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підставі розробленої технологічної інструкції ТІ 103.11.483-2007 і переглянutoї конструкторської документації "Тяговий електродвигун постійного струму ТЛ-2К1 ТЕ.155.034РСБ-Н" в липні 2008 року почали дослідно працювати над впливом системи електричної ізоляції Термоліт-Н при ремонті тягового електродвигуна ТЛ2К1. У таблицях 4.3 і 4.4 представлені результати випробувань тягових електродвигунів ТЛ-2К1, проведених на випробувальній станції ЧЕРЗ, з серійною системою електричної ізоляції і з новою системою електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н з визначення температури прогріву ізоляції. Випробування проводили при температурі навколишнього середовища (20-25°C), тобто значення температури, представлені в таблицях без урахування температури навколишнього середовища.

Таблиця 4.4 – Перегрів ізоляції ТЕД ТЛ-2К1 із системою класу нагрівостійкості Н, отримані на випробувальній станції

в °С

№ остова	№ якоря	$t_{\text{як}}$	$t_{\text{гп}}$	$t_{\text{як}}$
1107	458	80	109	87
6379	872	84	104	91
681	548	71	108	91
2672	38	84	108	60
8775	1921	79	108	83
859	263	83	112	91
8613	511	85	117	94
8678	221	83	107	62

З представлених даних видно, що серійна система ізоляції працює практично без запасу по перегріву ізоляції. Під час експлуатації відбувається теплове старіння ізоляції, і, як наслідок, можливий її пробій, що підтверджує більшу частину виходу з ладу електродвигунів в перші 200 тис км. Також причиною таких великих пробіїв є немонолітні ізоляції.

З даних таблиці 4.4 помітно, що перегриви менш високі в порівнянні з системою ізоляції класу нагрівостійкості F і двигуни мають значний запас для

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	0032.160133.000.04МР.ПЗ					







11. Яшенко С.А. Пути повышения уровня электрических и тепловых характеристик витковой изоляции при ремонте тяговых электродвигателей // Кабели и провода. — 2008. — №5. — С. 26—27.
12. Лысенко С.А., Евтушенко Ю.М., Иванов В.В. и др. Современные компаунды для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов // Тез. докл. IV Международной научно-технической конф. "Электрическая изоляция — 2006" (Санкт-Петербург, май 2006 г.) - СПбГТУ. 2006. - С. 116-117.
13. Яшенко С.А. Исследование влияния пропитки на качество витковой изоляции при ремонте ТЭД // Тр. XI Международной конференции "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты". — Крым, Алушта. — 2006. — Ч.1 -С. 63-65
14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967.-599 с.
16. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Мир, 1968. — 464 с.
17. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под об. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. — 2-е изд. перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 560 с.
18. Чечеткин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1986. — 344 с.
19. Ященко С.А. Исследование теплопроводности электроизоляционных материалов и корпусной изоляции класса нагревостойкости Н для тяговых электродвигателей // Тр. XII Международной конференции "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты" — Крым, Алушта. — 2008. — С. 45-46
20. Евтушенко Ю.М., Иванов В.В., Сидоренко К.С. и др. Пропиточные составы для систем изоляции класса нагревостойкости В, F, H, C. // Тр. V Международного симпозиума ЭЛМАШ - 2004 "Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования" - Москва, 2004. - Т. II. - С. 46-52

						<i>0032.160133.000.04MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

