

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Локомотиви"

"ДО ЗАХИСТУ"

Зав.кафедрою Б. Боднар Борис БОДНАР

" 11 " 01 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ
РУХОМОГО СКЛАДУ"

за освітньою програмою: "Локомотиви та локомотивне господарство"
зі спеціальності 273 "Залізничний транспорт"
галузі знань 27 "Транспорт"

Виконав: студент групи ЛГ2221

Артема Володимирського Артем ВОЛОДИМИРСЬКИЙ

Володимира Сердюка Володимир СЕРДЮК

Людмили Колодій Людмила КОЛОДІЙ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент Артема Володимирського

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н В СВІТОВОМУ ТА ВІТЧИЗНЯНОМУ ЛОКОМОТИВОБУДУВАННІ.....	11
1.1 Конструкції систем електричної ізоляції	11
1.2 Розробки та застосування систем електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н в історичному часі.....	17
1.3 Компоненти електричної ізоляції, які входять в систему електричної ізоляції	21
1.4 Причини виходу з ладу тягових електродвигунів на ПАТ Укрзалізниця.	24
1.5 Аналіз технології ремонту тягових електродвигунів на заводах ПАТ Укрзалізниця	25
1.6 Структура електроізоляційного матеріалу, що входить в систему електричної ізоляції і системи в цілому	29
1.7 Теплопровідність матеріалів, що входять в систему електричної ізоляції ...	31
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	38
2.1 Розрахункові схеми теплових опорів виткової ізоляції	38
2.2 Розрахункова схема теплового опору корпусної ізоляції	45
2.3 Розрахункова схема теплового опору пазовій ізоляції.....	46
2.4. Дослідження теплопровідності і компонентів, що входять в електроізоляційний матеріал і систему електричної ізоляції.....	47

					<i>0032.180145.000.02MP.ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Володимирський</i>			<i>Підвищення надійності тягових двигунів рухомого складу</i>	<i>Лит.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>		<i>Сердюк</i>				Н	5	
<i>Н. Контр.</i>		<i>Колодій</i>			<i>УДУНТ, зр. ЛГ2221</i>			
<i>Зав. Каф.</i>		<i>Боднар</i>						

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА	57
3.1. Дослідження плинності просочувального складу в просочених склослюдонитових стрічках.....	59
3.2. Підбір та обґрунтування технологічних режимів на підставі значень теплопровідності і плинності	63
4 ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н.....	71
4.1 Нові електроізоляційні матеріали для вузлів тягових електродвигунів і модернізація систем електричної ізоляції на їх основі.....	71
4.2 Проведення циклічних випробувань системи електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н із застосуванням нових електроізоляційних матеріалів	72
4.3 Розробка і перегляд нормативних документів для ремонтних підприємств Укрзалізниці для застосування нових електроізоляційних матеріалів	74
4.4 Проведення дослідних та промислово-дослідних робіт по ремонту і виготовленню тягових електродвигунів з модернізованою системою електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н.....	74
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

ВСТУП

Практикою експлуатації локомотивного парку встановлено, що одним і найменш надійних елементів тепловоза є тяговий електродвигун (ТЕД). По деяких типах тепловозів близько 50 % їх пошкоджень обумовлено відмовами ТЕД. Низька надійність двигунів часто викликана конструктивними недоліками, не завжди високою якістю ремонтного обслуговування в експлуатації і на ремонтних заводах, порушеннями режимів експлуатації (перевищення вагових норм, їзда з частиною відключених двигунів і ін.) і іншими причинами, що приводять до руйнування вузлів і деталей.

Однією з основних тенденцій розвитку електротехнічного обладнання є збільшення потужності і терміну служби, зниження габаритів та ваги електричних машин, підвищення класу нагрівостійкості і, як наслідок, їх надійності.

Найбільш затребуваними в модернізації на сьогоднішній день є електродвигуни, застосовувані в транспорті (тягові електродвигуни) і для видобутку корисних копалин (тягові електродвигуни для кар'єрних машин, рудничні, заглибні). Причинами відмов електричних машин є зростаюче навантаження, недосконалість технології їх виготовлення та ремонту, де застосовуються електроізоляційні матеріали недостатньої якості.

За останні 5 років актуальним стало питання про необхідність збільшення потужності і класу нагрівостійкості тягових електродвигунів, що експлуатуються у важких (екстремальних) умовах, підвищення їх надійності за рахунок застосування нових електроізоляційних матеріалів і вдосконалення технології їх ремонту.

Одним з напрямків модернізації системи електричної ізоляції тягового електродвигуна (ТЕД) є застосування сучасних вітчизняних електроізоляційних матеріалів з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності, що дозволяють збільшити ресурс електродвигуна і підвищити нагрів про стійкість електричної ізоляції. У свою чергу, застосування нових електроізоляційних матеріалів потребує вдосконалення технології їх переробки в систему електричної ізоляції при виготовленні і ремонті тягових електродвигунів.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Іншими напрямками модернізації підвищення надійності двигунів в експлуатації є поліпшення якості заводського ремонту, відновлення повною мірою їх ресурсу. За даними локомотиворемонтних заводів, близько 80% рекламаций по тепловозах приймається із-за пошкоджень тягових двигунів. Найчастіше причиною виходу з ладу ТЕД є пробій ізоляції обмотки якоря на корпус (близько 23 % від загального числа якорів, що поступають в ремонт) в місці виходу її з паза. Лабораторією надійності Смілянського ЕМРЗ встановлено, що близько 85 % вилучених при розбиранні якоря секцій мають механічні пошкодження ізоляції у вказаному місці. Це відбувається внаслідок перетирання її від коливань листів крайнього розпушеного пакету заліза якоря або від урізування в ізоляцію гострих кромek листів при збільшенні довжини сердечника.

Головним управлінням локомотивного господарства УЗ і Головним управлінням по ремонту рухомого складу і виробництву запасних частин (ЦТВР) прийнятий ряд заходів, направлених на підвищення надійності ТЕД тепловозів. Ці заходи передбачають, зокрема, скріплення кінцевого пакету заліза якоря для усунення його розпушування одним з видів зварювання. Скріплення пакету сприяє стабілізації габаритних розмірів сердечника та перешкоджає появі шкідливих для ізоляції вібрації листів. Проте відсутність науково обґрунтованих рекомендацій, пов'язаних з дослідженнями чинників, що визначають надійність кінцевої зони якоря, привела до безсистемності при здійсненні технологічних заходів.

З погляду оптимізації розміру пакету і пов'язаних з цим параметрів технологічного процесу представляється цікавим дослідження електромагнітних сил, що діють на листи крайнього пакету в аксіальному напрямі.

Оуботи за оцінкою цих сил для машин постійного струму, зокрема ж тягових двигунів з їх специфікою, відсутні. Тенденція збільшення одиничної потужності ТЕД, що намітилася останнім часом, приводить до зростання електромагнітних навантажень, що в свою чергу, обумовлює поява значних полів розсіяння в кінцевій зоні якоря. За літературними даними в могутніх генераторах сили електромагнітного походження досягають значень, здатних викликати залишкову деформацію крайніх листів. Циклічна дія цих сил в експлуатації нерідко приводить до

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

автономного зламу листів. Результати дослідження аксіальних електромагнітних сил в лобовій частині якоря ТЕД дозволять об'єктивно оцінити надійність цієї зони і встановити оптимальний розмір пакету, що скріплюється.

Метою цієї роботи є впровадження та дослідження комплексу електроізоляційних матеріалів для створення системи електричної ізоляції тягового електродвигуна, що забезпечує як мінімум подвоєння гарантійного пробігу електровозів з 175 тис. км до 350 тис. км і загального пробігу до 1 млн. 600 тис. км без капітального ремонту та підвищення технології ремонту ТЕД.

Магістерська робота спрямована на модернізацію існуючих конструкцій вітчизняних тягових електродвигунів на основі застосування нових електроізоляційних матеріалів і оптимізації технологічних режимів при їх ремонті. Застосування сучасних матеріалів з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності і оптимізація технологічних режимів ремонту дозволить збільшити клас нагрівостійкості системи електричної ізоляції, надійність і термін служби тягових електродвигунів при експлуатації в екстремальних умовах.

Основні завдання роботи:

1. Аналіз причин виходу з ладу тягових електродвигунів і технології їх виготовлення, виявлення причин виходу з ладу з вини електричної ізоляції.
2. Аналіз технології виготовлення систем електричної ізоляції, та технології ремонту ТЕД.
3. Оузробка основних принципів модернізації та технології виготовлення системи електричної ізоляції та ремонту ТЕД, усувувати основні недоліки та пошкодження ізоляції тягових електродвигунів, виявлених за даними експлуатації.
4. Оцінка технічних характеристик та властивостей нових компонентів системи електричної ізоляції та технології ремонту ТЕД.
5. Оузробка технічних вимог до матеріалів, що входять в систему електричної ізоляції. Дослідження основних параметрів системи електричної ізоляції.
6. Апробація матеріалів та технології виготовлення системи електричної ізоляції.

Підвищення якості ремонту ТЕД тепловозів можливо лише на основі максимальної механізації і автоматизації технологічних процесів. Вживана в більшості

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

випадків ручна дугова зварка штучними електродами є процесом, результат якого цілком залежить від кваліфікації зварювальника і інших суб'єктивних чинників.

Створення систем машини для комплексної механізації і автоматизації виробничих процесів у всіх галузях транспорту – одне з найважливіших завдань ремонтних служб і працівників заводів ЦТРЗ [1].

Для вирішення проблеми створення такої системи на сучасному науковому рівні необхідно розробити адекватні математичні моделі процесів зварки. Такий підхід дозволить наблизитися до раціональних, а в кращому разі оптимальних (по вибраних критеріях якості) режимів зварки [2]. Нслідки механізації і автоматизації зварювального виробництва багатобразні. Їх можна звести до двох груп: соціальні і економічні. Тому критерії доцільності механізації і автоматизації також можуть бути соціальними і економічними.

Поліпшення конструкції двигунів, що випускаються промисловістю, модернізації експлуатованих ТЕД, припинення порушень режимів експлуатації, поліпшення системи технічного обслуговування та поточного ремонту ТЕД на залізницях, підвищення якості та надійності їх заводського ремонту на основі всесвітньої автоматизації і механізації технологічних процесів, усунення причин, що викликають руйнування вузлів і деталей тягових електродвигунів.

Таким чином, підвищення надійності ТЕД є актуальною проблемою, яка повинна вирішуватися комплексно, шляхом створення нових конструкцій високонадійних електродвигунів.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 АНЛІЗ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н В СОТЬОМУ ТА ОТЧИЗНЯЄМУ 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 застосовують 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 відомий ряд зарубіжних фірм, які випускають тягові електродвигуни з системою електричної ізоляції класу нагрівостійкості Н.

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

В ті ж роки фірма General Electric Co (США) застосувала поліамідну плівку КЕПТОН для ізоляції якорних і статорних обмоток тягових електродвигунів швидкісних поїздів (до 176 км/г) Нью-Йорк – Вашингтон. Поліамідна плівка

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

використана у вигляді стрічки для безперервної виткової і корпусної ізоляції. В якості просочувального складу для просочення обмоток застосований поліамідний лак [2].

У новій серії крупних електричних машин для металургії МЗЗ фірмою General Electric Co, (США) з метою підвищення надійності і перевантажувальної здатності вперше були використані ізоляції номекс і полііміди. Поєднання зазначених матеріалів забезпечило дуже високу надійність і кращі технічні показники машин [3].

При ремонті тягових електродвигунів тепловозів в майстернях California Shops залізнична компанія Santa Fe (США) використовувала для ізоляції обмоток матеріали з поліамідної плівки КЕПТОН, що дозволило на 20 % збільшити заповнення пазів міддю та підняти потужність двигунів до 450 кВт. При цьому перші з модернізованих електродвигунів мали середній пробіг 1083200 км між ремонтами з заміною обмотки, тоді як з іншою ізоляцією в тих же, досить важких умовах, середній міжремонтний пробіг не перевищував 523 200 км. Модернізовані двигуни з поліамідною ізоляцією працюють на локомотивах найважчого вантажного поїзда в світі «Super 3 Santa Fe» (Лос-Анджелес – Чикаго і назад з середньою швидкістю 112 км/год через гірські перевали) [4]. Позитивні результати були отримані фірмою Byron Jackson Pump Division відділенням Borg-Warner Corp. (США) при використанні плівки КЕПТОН F для ізоляції провідників обмотки заглибних електродвигунів нафтових насосів, замість емальдротів зі скловолокнистої ізоляцією. Ізоляція забезпечувала перевантажувальну здатність в межах до 240°C тривало і до 400°C короткочасно. Потужність кожної секції двигуна діаметром 140 мм збільшена до 300 кВт. Підвищено волого та маслостійкість ізоляції, її термін служби збільшився приблизно в 4 рази [5].

Аналогічні конструкції ізоляції в заглибних електродвигунах нових типів прийняті також американськими фірмами Reda Pumps (відділення TRW Соф.) I Oiline (відділення FMC Corp.) [6].

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

У США випускаються авіаційні генератори з поліамідною ізоляцією, розраховані на роботу при напрузі 208 В та перевантаженнях 50 % протягом 2 хв і 200 % протягом 5 с.

Генератор потужністю 20 кВт при випробуваннях пропрацював без руйнування понад 600 годин при температурі 358°C, штучно підвищеної шляхом продування гарячого повітря [7].

У 1968 р японська фірма Toshiba почала випуск тягових електродвигунів з «ультра-ізоляцією» класу нагрівостійкості С (220°C) на основі поліамідів з високим коефіцієнтом заповнення паза. Випущена і успішно експлуатується велика партія двигунів у кількості понад 650 шт. Обмотка якоря виконана з емаль-дроту з поліамідною ізоляцією (виткова ізоляція), корпусні ізоляція – з поліамідної плівки, попередньо покритих спеціальними складами для підвищення дугостійкості і короностійкості, і міканіту. Просочення обмотки проводилося під вакуумом смолою без розчинника (компаундом). Якір має нагрівостійкі клини, бандаж і т.д. Маса якоря на 20 % менше, ніж у якоря з епоксидної ізоляцією [8].

У Франції (Управлінням французьких залізниць і фірмою Alstom) було прийнято рішення про використання в усіх нових типах тягових електродвигунів ізоляції на основі поліамідної плівки КЕПТОН. У зв'язку з цим фірмою Alstom було проведено економічне дослідження вигідності виробництва таких двигунів [9, 10]. Аналіз численних даних, отриманих для різних конструкцій ізоляції на основі поліамідної плівки, показав, що вартість виготовлення кожного кіловата потужності електродвигуна знижується на 3–9 %. Якщо залишаються незмінними розміри двигуна, то за рахунок збільшення кількості активної міді потужність двигуна зростає на 12 %, а вартість ізоляції всього на 2–3 %, що здешевлює кожен кіловат потужності на 8–9 %. Якщо потужність двигуна залишається незмінною, 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 поліамідної плівковою ізоляцією в усіх випущених електродвигунах для електровозів. Електродвигуни

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

потужністю 350 кВт газотурбовоза (наприклад, локомотив високошвидкісного експресу Париж – Ліон, швидкість 300 км/год) 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), Caputal (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/год. Фірма Chemins de Fer Siss застосовує плівку КЕПТОН при виготовленні якірної обмотки тягових електродвигунів потужністю 515 кВт. Просочення обмоток проводилося 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, які 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), корпусні ізоляція – гільзового типу з плівки 300Н 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 [12–14].

Західнонімецька фірма АЕГ В виробник великих електричних машин 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

					<i>0032.180145.000.02MP.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

виконується одним шаром в півнахлесту плівки КЕПТОН F товщиною 0,0375 мм або КЕПТОН товщиною 0,025 мм. Оубоча 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].

Ї 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 Н.

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 склослюдінітові стрічки з кремнійорганічним еластомерним покриттям. Секції після ізолювання вулканізованої 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, ЮМЕКС 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 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 велику температурну перевантаження [12].

ЮМЕКС М застосований для пазової ізоляції секційних і стрижневих обмоток електричних машин відповідального призначення, в тому числі тягових, і передбачає нанесення безперервної корпусної ізоляції, покладеної обмоткою в якір з послідуочим просоченням складом без розчинника.

Фірма ASEA (Швеція) застосувала поліамідну плівку КЕПТОН Н товщиною 0,127 мм для ізоляції роторних стрижнів асинхронних електродвигунів класів

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

нагрівостійкості F і H. Завдяки цьому було збільшено термін служби і безпеку роботи машин.

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

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

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 Н і С і помітити тенденцію до розширення їх використання в електрообладнанні, в першу чергу з важкими або екстремальними умовами експлуатації.

1.2 Оузоубки та застосування систем електриччєї ізоляції класу ьгрівостійкості Н в історичєму 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 Н або С, як правило), основні електричні характеристики покращені. Це в значній мірі визначило вибір електроізоляційних матеріалів і стимулювало дослідження поліамідної плівки ПМ і паперу з ароматичного поліаміду з метою розробки на їх основі конструкцій ізоляції.

Значний обсяг випробувань був виконаний на макетах стосовно ізоляції тепловозних тягових електродвигунів.

За результатами порівняльної оцінки, критеріями якої були опір зрушенню і розшарування склеєних зразків, з групи досліджених полімерів в якості клею для поліамідної плівки і паперу ЮМЕКС був обраний кремнійорганічний полімер 238, що забезпечує достатню міцність клейового з'єднання після термообробки і високу еластичність нетермообробленої ізоляції. Ці якості дуже важливі для забезпечення необхідної технологічної стійкості ізоляції до ударів і особливо вигинів при укладанні (кут перекоосу секцій до 15–20°).

Було показано, що безперервна ізоляція на основі плівки ПМ має достатньо високу електричну міцність, що дозволяє використовувати плівку в якості основного матеріалу для виткових та корпусних ізоляцій (рис. 1.1). Наведені

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

залежності дозволяють оцінити рівень електричної міцності безперервної багатошарової ізоляції, вибрати доцільне число шарів і розрахувати ймовірні значення пробивних напруг натурних обмоток з урахуванням масштабного фактора. Електрична міцність плівкової ізоляції при числі шарів не менше трьох близька до максимальної і значно вище, ніж у скломікалентної та поліамідної ізоляцій.



Рисунок 1.1 – Залежність електричної міцності неперервної багатошарової ізоляції від товщини (кількості шарів)

1 – поліімідна плівка ПМ товщиною 0,04 мм, склеєна кремнійорганічним полімером; 2 – те ж, товщиною 0,055 мм; 3 – папір ІЄМЕКС 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).

значення пробивних напруг істотно вище рівня можливих експлуатаційних перенапруг і свідчать про можливість тривалого подальшого використання ізоляції після обсягу випробувань, приблизно відповідного 35–40 тис. Год роботи ізоляції при середній температурі 200°C.

На основі результатів виконаних досліджень і спільної (ВЕІ і НДІ заводу «Електроважмаш») технологічної опрацювання на заводі «Електроважмаш» (м. Харків) виготовлені дослідні партії тягових електродвигунів тепловозів з поліамідно-кремніеорганічною плівковою ізоляцією якірної обмотки. Наведені в таблиці 1.2. 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 (розділ 1.1 і 1.2) відносяться до досліджень, проведених в 70-х роках минулого століття як в США і Європі, так і в СРСР. Але отримані дані широко застосовуються тільки за кордоном. Технології виготовлення систем електричної ізоляції удосконалюються і розвиваються при виготовленні електричних машин також тільки закордонними фірмами. Наприклад, більшість тягових електродвигунів виготовляються за технологією вакуум-нагнітальною просочення, що покращує електричні і теплофізичні властивості електричної ізоляції цих машин. У нашій країні вакуум-нагнітаючим способом виготовляються тільки нові двигуни, ізоляція ремонтваних двигунів просочується методом занурення.

1.3 Компоненти електричної ізоляції, які входять в систему електричної ізоляції

Для дослідження систем електричної ізоляції необхідно більш детально вивчити кожен матеріал, який входить в цю систему. До складу системи електричної ізоляції входять різні компоненти і електроізоляційні матеріали.

Дуже часто електрична ізоляція складається з двох і більше матеріалів. У разі електричної ізоляції тягових електродвигунів, наприклад, система ізоляції є багатоконпонентної, або іншими словами, тут використовуються композиційні

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

матеріали (склопластик можна вважати композиційним матеріалом, який складається із мінімум двох компонентів – склотканина, просякнута лаком і запресована при певному тиску і певній температурі).

Нерідкі випадки використання трьох або чотирьох-компонентних композиційних матеріалів.

До трикомпонентних композицій можна, наприклад, віднести матеріали, які включають у себе:

- склотканину, плівку та сполучні;
- склотканину, слюдяний папір та сполучні;
- плівку, папір (слюдяна, універсальна) та сполучні;
- плівку, склотканину і сполучні.

Залежно від структури композиційного матеріалу, часто їх можна розділити на двошарові і тришарові. Сполучна в більшості випадків застосовується для склеювання компонентів між собою і для просочення композиції.

До чотирьохкомпонентних композицій можна віднести матеріали, що складаються із склотканини, слюдяного паперу, плівки й сполучного. Також із деякими умовностями можна до чотирьохкомпонентних композицій віднести матеріали, що складаються з двох склотканин (різної щільності і товщини або склотканина і склосітка), слюдяного паперу і сполучного.

Основні вимоги, що пред'являються до компонентів, що входять в композиційний електроізоляційний матеріал для електричних двигунів:

- високі електричні властивості (електрична міцність, опір, малі діелектричні втрати);
- високі механічні властивості;
- високі теплові властивості (теплопровідність, можливість тривалий час працювати при високих температурах без зниження електричних і механічних властивостей);
- сумісність компонентів між собою при виготовленні електроізоляційного матеріалу (без зниження вище згаданих властивостей);
- екологічність;

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

– відносна дешевизна компонентів електроізоляційного матеріалу.

Для забезпечення всіх вище перерахованих вимог в системі електричної ізоляції такими ж властивостями повинні володіти електроізоляційні матеріали та компоненти, вхідні в ці композиції.

По ряду причин, широкого застосування до 2005 року в Україні матеріали з високими теплофізичними і електричними властивостями, як і технології виготовлення систем електричної ізоляції на їх основі, для більшості електричних машин з важкими умовами експлуатації не знайшли. Їх «досить» нових тягових електродвигунах (розроблених в кінці 80-х років минулого століття) до цього дня в якості корпусної ізоляції полюсних котушок застосовуються мікаленти, ізолювання котушок (і полюсних, і якірних) проводиться ручним способом, просочення методом занурення. Критерієм остаточного (достатнього) просочення таким методом є відсутність бульбашок на поверхні просочуючих, його складу (як правило, лак), а не який-небудь показник, виражений чисельно.

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 імпортовані 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 їхніх 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).

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

1.4 Причини виходу з ладу тягълых електроудвигунів нь ПАТ Укрзалізниця.

Нь рисунку 1.2 представлена діаграма пошкоджень тягових електроудвигунів.

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

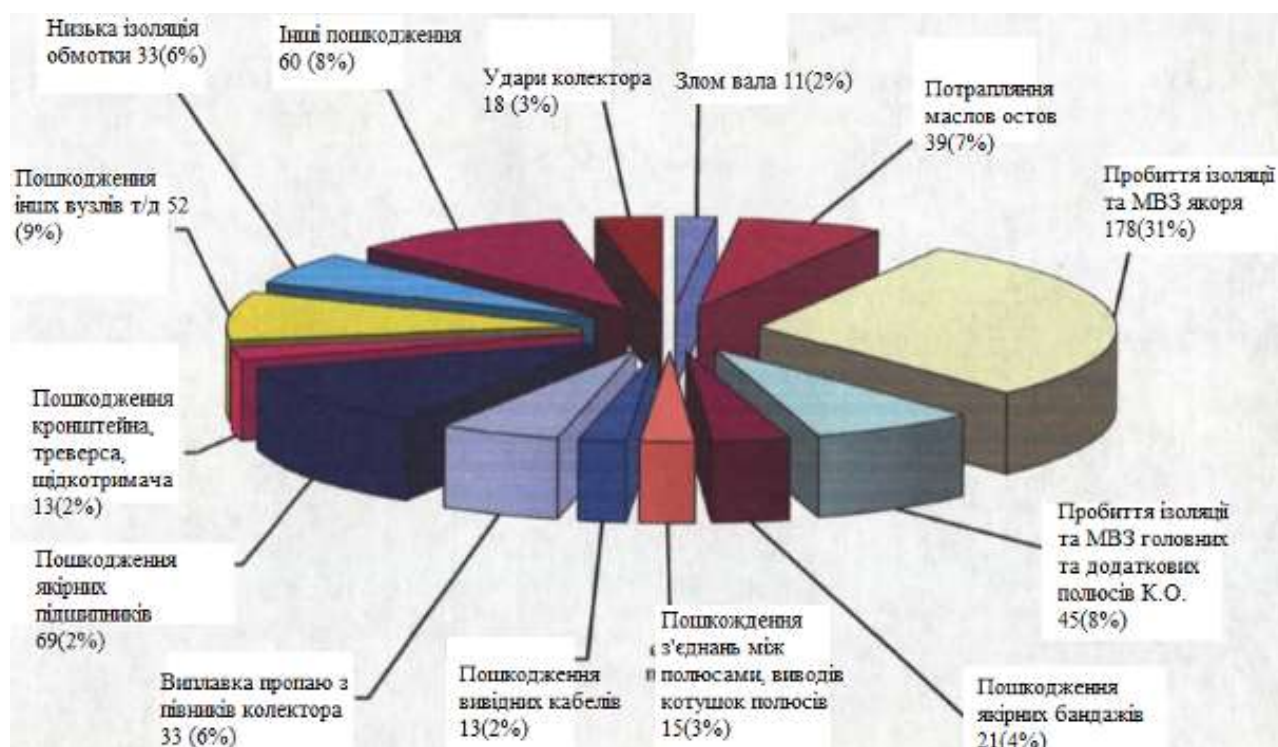


Рисунок 1.2 – Причини виходу з ладу тягових електроудвигунів

Нь рисунку 1.3 представлено розподіл кількості відмов тягових електроудвигунів на прикладі удвигуна ТЛ-2К з пробігів від заводського ремонту (всього 2500 од.).

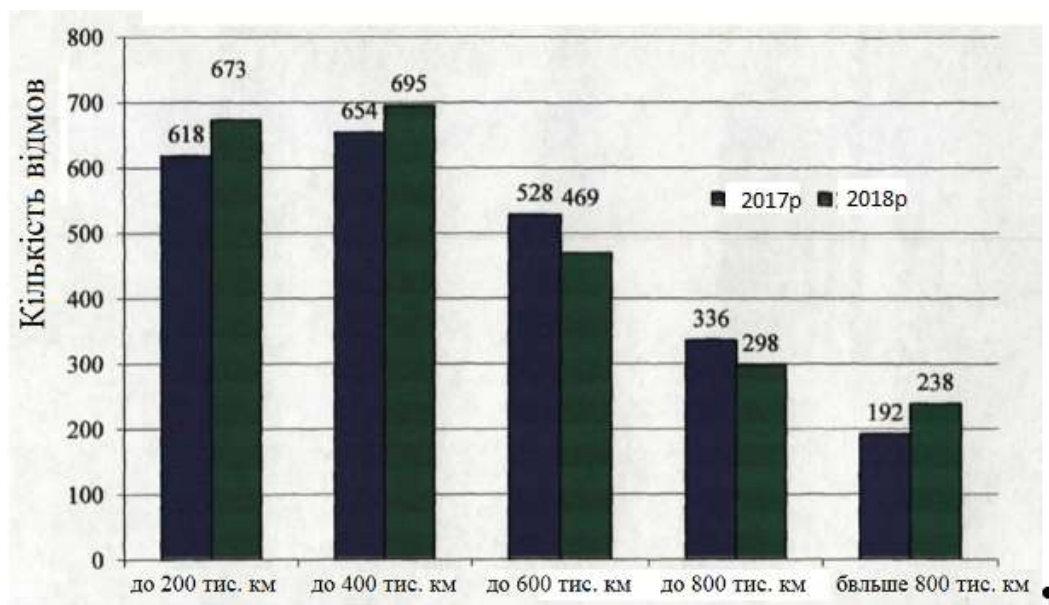


Рисунок 1.3 – Оузподіл кількості відмов тягових електродвигунів ТЛ-2К до відмови

За даними ПАТ Укрзалізниця загальна кількість тягових електродвигунів електровозів на залізниці становить близько 8000 одиниць. З них приблизно 2500 одиниць – це тяговий двигун ТЛ2К, який ремонтують лише два заводи – Запорізький та ДП завод «Електротяжмаш».

Пройшовши капітальний ремонт на цих заводах, більшість двигунів виходить з ладу на перших 200 тисячах кілометрів пробігу. Гарантійний пробіг для такого електродвигуна після ремонту становить 160 тис. км. Щомісяця на одному підприємстві в ремонті знаходиться близько 200 од. тягових електродвигунів. Причини відмов ТЕД після капітального ремонту можуть бути наступні:

- умови експлуатації;
- якість матеріалів, що застосовуються;
- технологія проведення ремонту.

1.5 Аьліз техієлогії ремонту тягьих електроудвигунів нь зїюдах ПАТ Укрзалізниця

Порівнюючи сьогоднішній стан справ із існуючими електроізоляційними матеріалами та системами ізоляції в Україні з закордонними аналогами, можна

зробити висновок, що вітчизняне виробництво відстало як мінімум на 50 років. 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.

Ї 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 тягових електродвигунів використовують голий мідний дріт марки ПММ, а для полюсних і компенсаційних котушок повсюдно на всіх підприємствах використовують неізольовану мідну шину.

Ї 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.

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

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26



Рисунок 1.4 – Діаграма сушки, просочення і термообробки вузлів ТЕД, просочених в 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 склослюдинітової стрічки, летючі з внутрішніх шарів скупчуються всередині ізоляції, тому що зовнішні шари полімеризуються швидше внутрішніх. Між шарами склослюдинітової стрічки залишаються повітряні проміжки. Отже, ізоляція виходить немонолітні з безліччю повітряних включень і подальша просочення зануренням в лак ефективності не дає. Одбувається заповнення мікротріщин і пор, що знаходяться зовні, іншими словами, відбувається лакування поверхні вузла тягового електродвигуна, виткової ізоляції залишається просочення.

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

Ї сьогоднішній день при ремонті тягового електродвигуна використовуються наступні матеріали:

- голий мідний дріт для якірної секції (шина для полюсних і компенсаційних котушок);

- виткова ізоляція з просоченої слюдяною стрічки (ЛСК-110ТПл, ЛСЕП-934ТПл
- клас нагрівостійкості В);
- корпусні ізоляція з просоченої слюдяною стрічки (ЛСК-110ТПл, ЛСЕП-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 склострічки 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.

Для збільшення ресурсу тягового електродвигуна необхідно підібрати електроізоляційні матеріали одного класу нагрівостійкості (що відповідають умовам експлуатації), сумісні між собою за хімічними та технологічними параметрами, 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);

						0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

- 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

Оузглянемо більш докладно структуру кожного електроізоляційного матеріалу, що входить в систему електричної ізоляції:

1.6.1 Виткля 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 для виключення механічних пошкоджень поверх емалі нанесено два шари

					<i>0032.180145.000.02MP.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		29

склонитки, які в процесі просочення якорів просочуються і склеюють провідники між собою, виключаючи їх руху відносно один одного в процесі роботи. Для збільшення електричних та теплових характеристик обмотувального дроту поверх емаль-лаку може наноситися плівка (поліімідного або полііміднофторопластового). У разі використання голого обмотувального дроту в розроблюваних системах пропонується використовувати слюдяні стрічки, просочені новими сучасними просочувальними компаундами класу нагрівостійкості F і H, і якими буде проводитися основна просочення якоря або полюсних котушок.

1.6.2 Корпусь ізоляція

Структура корпусної або, як її ще по-іншому називають, основної ізоляції і для застосовуваних матеріалів, і для розроблюваних систем електричної ізоляції, залишається однією і тією ж – просочена слюдяна стрічка (склотканина + слюдяний папір + полімерна плівка + просочувальний склад). Єдиною відмінністю для розроблюваних систем електричної ізоляції є просочувальний компаунд, що входить до складу просоченої слюдяною стрічки. Як полімерної плівки пропонується застосовувати поліамідного. Стрічка містить сполучне, яким буде проводитися просочення якоря або полюсних котушок. Також альтернативним варіантом корпусної ізоляції розроблюваної системи електричної ізоляції можуть бути напівпросочені стрічки (сполучного 10–16 %) і непросочені стрічки (сполучного до 5 %).

В іншому структура системи електричної ізоляції аналогічна застосовуваної, але вживані матеріали мають різний клас нагрівостійкості на відміну від запропонованої.

Основну електричне навантаження тягових електродвигунів несуть виткового і корпусні (основна) ізоляції. У зв'язку з цим необхідно вивчити вплив кожного матеріалу, що входить в корпусні ізоляцію, на електричні та теплові характеристики. Як наводилося вище, корпусні ізоляція складається з склотканини, слюдяного паперу, полімерної плівки і просочує складу.

У таблиці 1.3 наведені дані, що характеризують властивості кожного матеріалу, що входить в корпусні ізоляцію.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

1.7 Теплопрідність матеріалів, що входять в систему електричної ізоляції

Як вже зазначалося вище, електрична ізоляція тягового електродвигуна повинна володіти не тільки високими електричними характеристиками, але і повинна довго працювати при допустимих підвищених навантаженнях, підвищених температурах. Для роботи тягового електродвигуна при підвищених температурах без погіршення електричних властивостей ізоляції, вузли тягового електродвигуна повинні мати хороше відведення тепла.

Таблиця 1.3 – Властивості, що характеризують кожен матеріал, що входить в систему ізоляції

Компонент корпусної ізоляції		$E_{пр}$	$M_{пр}$	λ при $t = 150 \div 200^\circ C$	ρ , Ом·м	ϵ	нагріво-стійкість	технологічність в переробці
Слюдяний папір		низька	низька	0,06÷0,08			>300°C	малотехнологічна
Скляна тканина		низька	висока	0,06÷0,08	10^{17}	6,3	>300°C	технологічна
Полімерна плівка		висока	висока	0,08÷0,14	$>10^{17}$	2,1÷3,5	F÷C	технологічна
Просочувальний склад	неполімеризований	низька	низька					технологічний
	полімеризований	висока	висока	0,24÷0,35	10^{14}	6,0	F÷C	не технологічний

В умовах експлуатації двигуна буває недостатньо мати хорошу вентиляцію. Необхідно, щоб тяговий електродвигун мав систему електричної ізоляції, розраховану на конкретні умови експлуатації, і з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності.

Кращими провідниками теплоти є тверді неорганічні речовини, в більшості випадків метали, у яких λ лежить в межах від 3 до 418 Вт/м·К). Коефіцієнти теплопровідності чистих металів, за винятком алюмінію, зі зростанням температури зменшуються. Теплоту в металах переносять головним чином вільні електрони. Самим теплопровідність металом є чисте срібло ($\lambda = 418$ Вт/м·К),

Коефіцієнти теплопровідності матеріалів, що мають пористу структуру (теплоізоляційні), при підвищенні температури зростають за лінійним законом. Значний вплив на коефіцієнти теплопровідності пористих матеріалів надають гази, що заповнюють пори і які мають дуже малими коефіцієнтами теплопровідності в порівнянні з λ твердих компонентів. Саме повітря або гази, що заповнюють пори і порожнини і мають досить малі значення λ , справляють істотний вплив на теплопровідність матеріалу в цілому. Пористі матеріали передають теплоту в основному через твердий компонент («скелет») і в меншій мірі через повітряні комірки, так як теплопровідність твердого компонента в десятки разів перевищує теплопровідність повітря. Тому коефіцієнт теплопровідності пористих матеріалів сильно залежить від співвідношення мас «скелета» і повітряних включень, тобто від об'ємної щільності матеріалу. Зі зменшенням об'ємної щільності, тобто з зануренням стінок комірок, передача теплоти по «скелету» матеріалу погіршуються, але при цьому збільшуються розміри повітряних включень, що призводить до появи всередині їх організованого руху молекул, тобто до конвективного теплообміну. З підвищенням температури погіршуються теплоізоляційні властивості пористих матеріалів. Це пояснюється збільшенням коефіцієнта теплопровідності повітря і зростанням ролі променистого теплообміну між стінками повітряних комірок, а також виникненням вільної конвекції в порах і комірках матеріалу.

Дана теорія описує процеси, що відбуваються в теплоізоляційних матеріалах. В деякій мірі ці міркування можна застосувати і до електроізоляційних матеріалів, тому що склотканини, слюдяні папери в чистому вигляді мають пористу структуру. Їх рисунках 1.5 і 1.6 представлені залежності теплопровідності склотканини і слюдяного паперу в початковому стані відповідно від температури, де підтверджується наявність повітряних включень низькими значеннями теплопровідності. Склотканина за своєю будовою має сітчасту структуру, володіє безліччю повітряних включень і в чистому вигляді є хорошою теплоізоляцією.

					<i>0032.180145.000.02MP.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

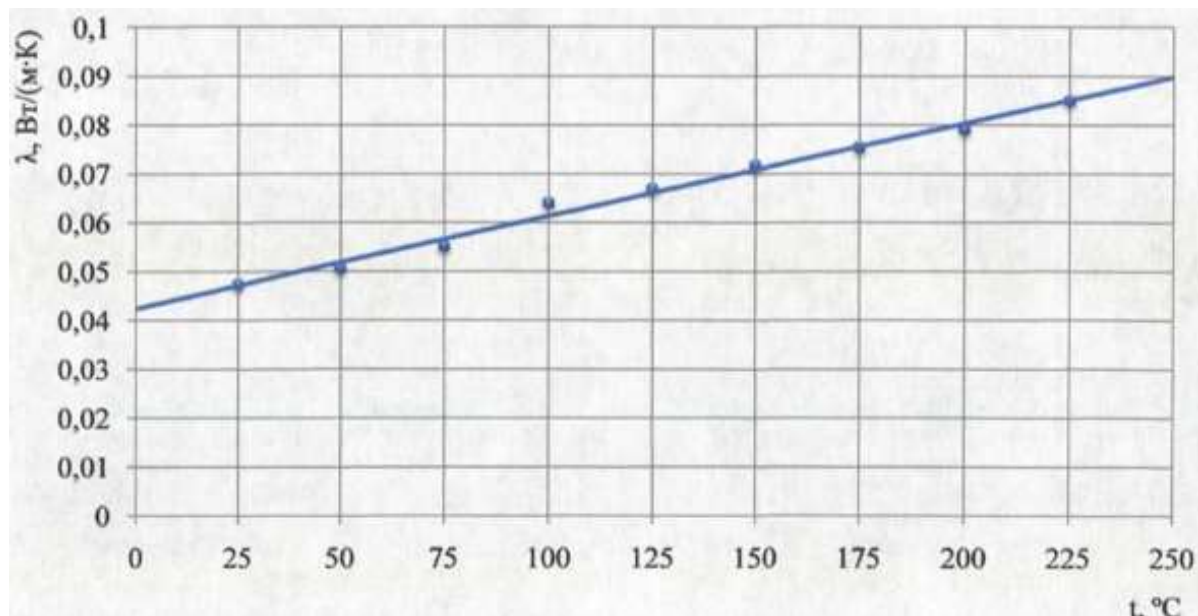


Рисунок 1.5 – Залежність коефіцієнту теплопровідності склотканини від температури

У готовій системі електричної ізоляції тягового електродвигуна також можуть бути присутніми повітряні включення (як в нашому випадку ремонту тягових електродвигунів), які утворюються в результаті застосовуваної технології і використовуваних електроізоляційних лаків. Утворені повітряні включення знижують не тільки теплопровідність системи, а й електричну міцність.

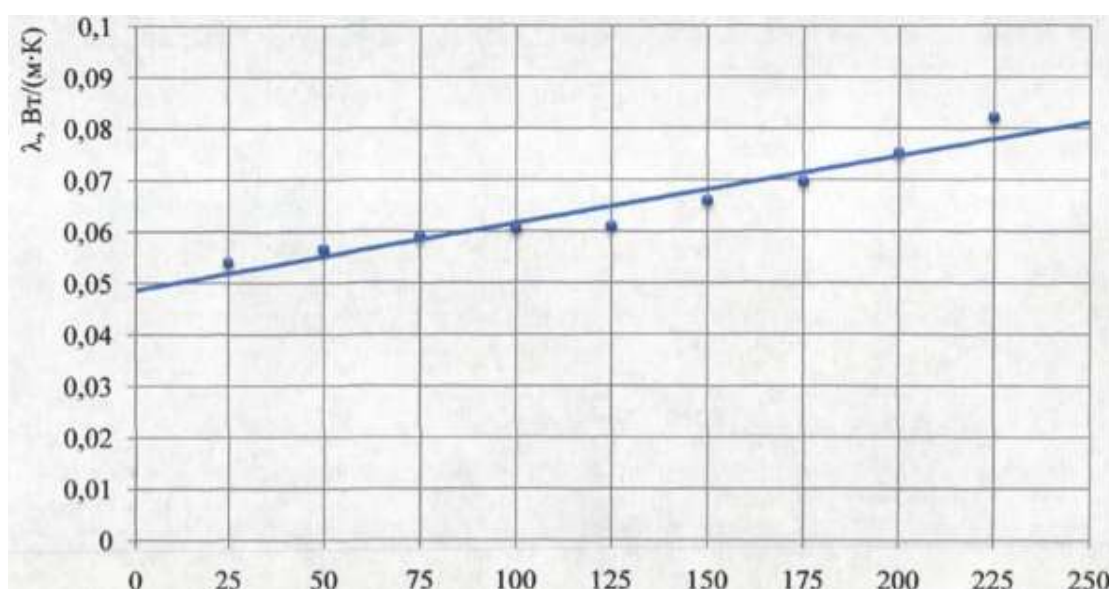


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнту теплопровідності слюдяного паперу від температури

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.

Як вже описувалося вище, теплопровідність металів досить велика. У нашому випадку більший інтерес представляє мідь та електротехнічна сталь. Для міді $\lambda_m = 385 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, для електротехнічної сталі $\lambda_{ел. \text{ сталі}}$ становить від 20 до 45 $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$. Теплопровідність традиційних електроізоляційних матеріалів становить від 0,10 до 0,23 $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$. Внаслідок цього перепади температури в ізоляції обмоток електричних машин виходять значними, що ускладнює охолодження обмоток і обмежує величину лінійної навантаження і щільності струму. Ї рисунку 1.7 схематично зображено відведення тепла Q від провідника, розташованого в пазу якоря.

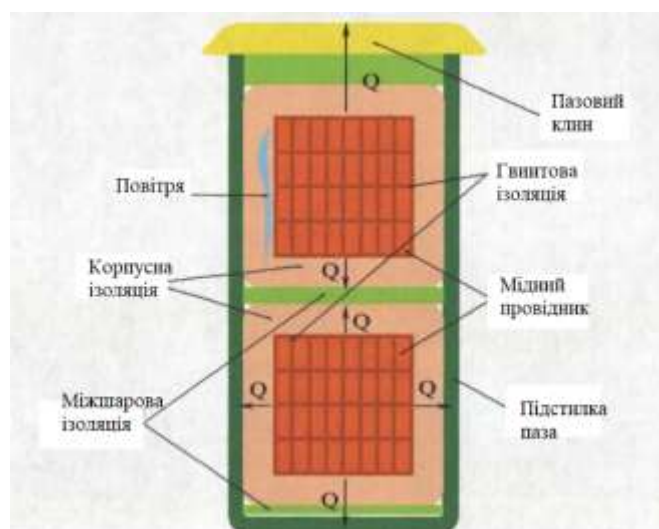


Рисунок 1.7 – Схема відводу тепла від провідників якірної секції

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

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 1.3, отримані дослідним шляхом і будуть описані нижче більш докладно.

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 багатоконпонентна, необхідно підбирати матеріали з більш високими коефіцієнтами, що практично 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.

К органічним компонентам 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. Оубоча 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.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

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 нагрівостійкості можуть застосовуватися при 600–800°C. Коефіцієнт теплопровідності слюди $\lambda_{сл} = 0,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

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.

Для поліамідної плівки наведено значення коефіцієнта теплопровідності, отримані в середині 60-х років фірмою Du Pont (США) на плівці КЕПТОН Н (аналог радянської або російської поліамідної плівки):

З представлених значень видно збільшення коефіцієнта теплопровідності з ростом температури. Ї вітчизняній поліамідній плівці значення вийшли трохи нижче. Ї рисунку 1.8 представлена залежність коефіцієнта теплопровідності поліамідної плівки від температури.

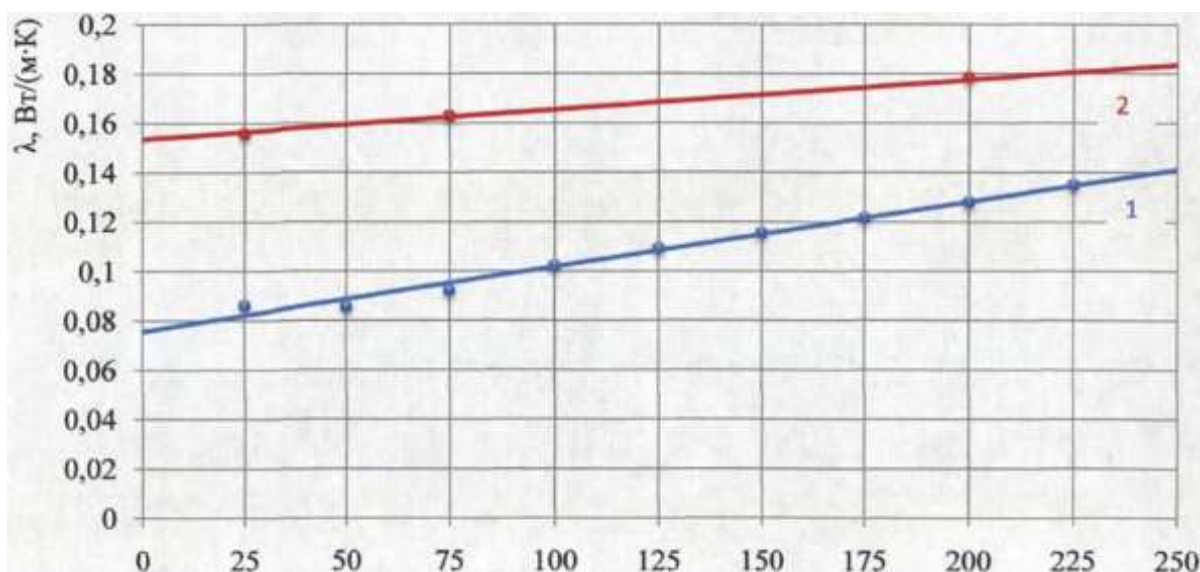


Рисунок 1.8 – Залежність коефіцієнта теплопровідності поліамідної плівки ПМ (вітчизняної – 1 і імпортової – 2) від температури

У 2020 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 МОЮЛІТ-2 (ЛСКН-160-ТТ + компаунд ЕМТ-1) $\lambda = 0,25$ Вт/м·К; ізоляція типу МОЮЛІТ-4 (ЛСЕК-5-СПЛ + плівка Ф-4Е0 + ЛЕС + компаунд ЕМТ-1) мала $\lambda = 0,15-0,17$ Вт/м·К; ізоляція типу ЛСЕК-5-СПЛ (ЛСЕК-5-СПЛ + ЛЕС + ФЛ-98) $\lambda = 0,06-0,12$ Вт/м·К.

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

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 1. 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°C, щоб виключити полімеризацію просочених стеклослюдинітових стрічок та забезпечити монолітність ізоляції при подальшій просочення.

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

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГЛЮГО ЕЛЕКТРОУДВИГУ

Як вже зазначалося вище, великий вплив на багато властивостей електричної ізоляції, на потужність електричною машини має теплопровідність електроізоляційного матеріалу та монолітність електричної ізоляції. Якірні котушки (секції) в поперечному перерізі має прямокутний вигляд. Їх рисунку 1.7 схематично представлено поперечний розріз паза якоря з укладеними ізольованими якірними секціями.

2.1 Оузрахункльї схеми теплльх опорів виткльої ізоляції

Основним джерелом тепла в якорі є провідники (витки) якірної секції і діелектричні втрати в ізоляції. Поширення тепла відбувається по чотирьох напрямках (рис. 1.7): 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. Оузглянемо 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

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 (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. Оузглядаючи поширення теплового потоку через виткову ізоляцію, можна представити схему теплових опорів. Вона може мати два вигляди.

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

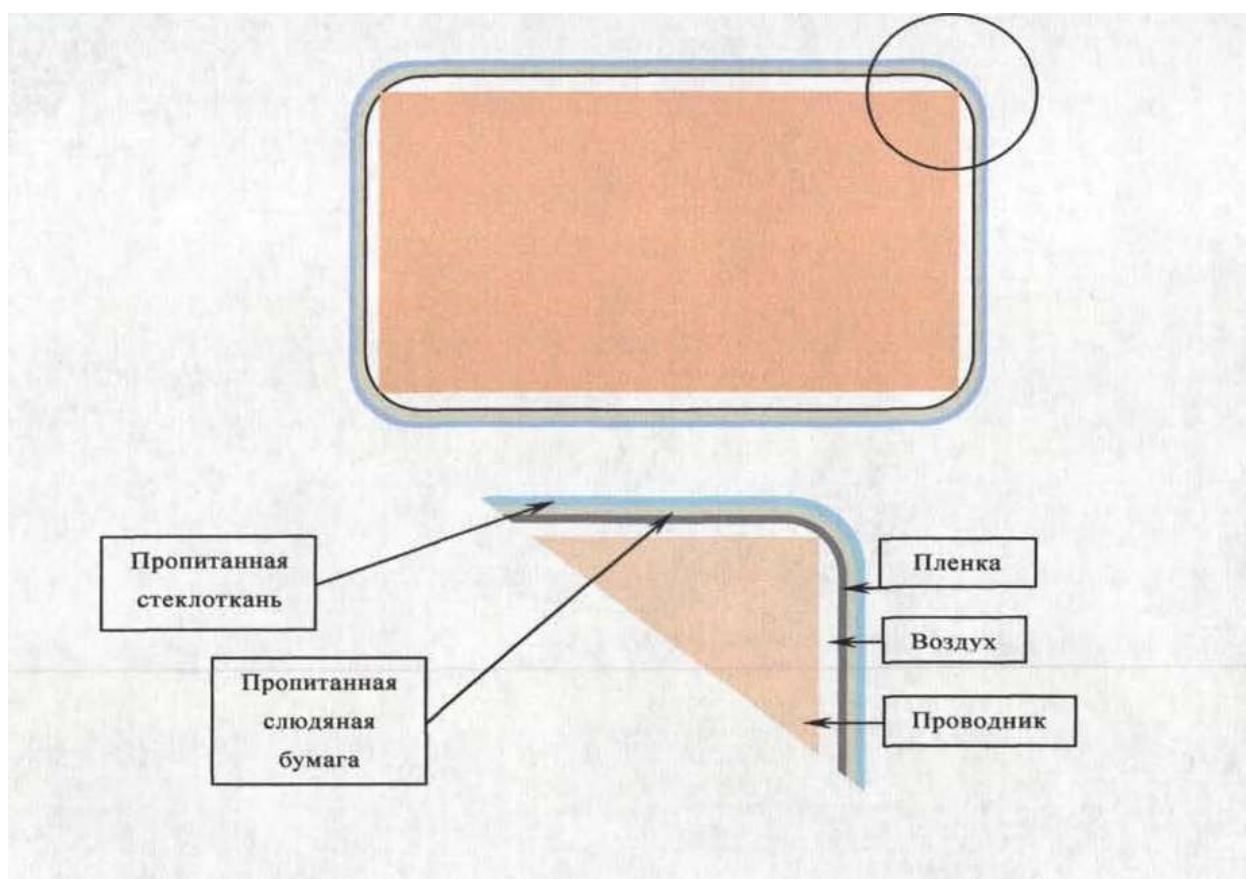


Рисунок 2.2 – Ізолювання витка склослюдинітовою стрічкою

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 теплових опорів виглядають таким чином (рис. 2.3):

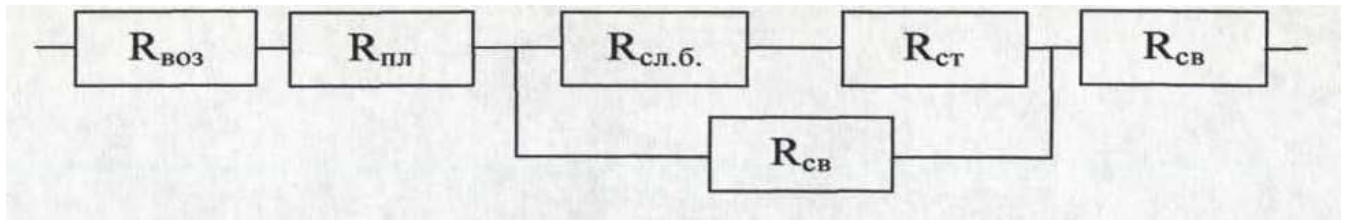


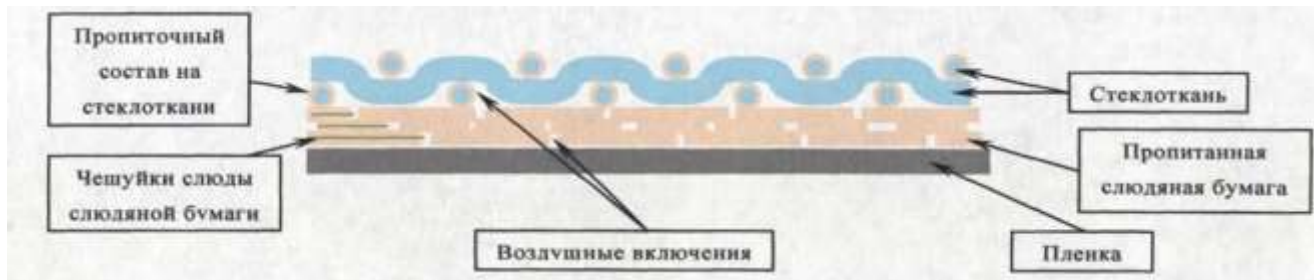
Рисунок 2.3 – Схема теплових опорів виткової ізоляції з просоченою склослюдинітовою стрічкою:

$\hat{a} \hat{i} \zeta$ – тепловий опір повітря; $\hat{i} \hat{e}$ – тепловий опір плівки; $\hat{n} \hat{e} \hat{a}$ – тепловий опір слюдяного паперу; $\hat{n} \hat{o}$ – тепловий опір склотканини; $\hat{n} \hat{a}$ – тепловий опір просочувального складу (яким просочена стрічка)

Оузрахунковий тепловий опір виткової ізоляції аналогічно електричному розраховується по формулі:

$$\hat{a} \hat{e} \hat{o} \hat{a} \hat{i} \zeta \hat{i} \hat{e} \frac{\hat{n} \hat{e} \hat{a} \hat{n} \hat{o} \hat{n} \hat{a}}{\hat{n} \hat{e} \hat{a} \hat{n} \hat{o} \hat{n} \hat{a}} \hat{n} \hat{a} . \quad (2.1)$$

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. Ї рисунку 2.4 зображена детальна схема склослюдинітової стрічки.



Рисунку 2.4 – Схемне зображення компонентів, що входять в склослюдинітову стрічку

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

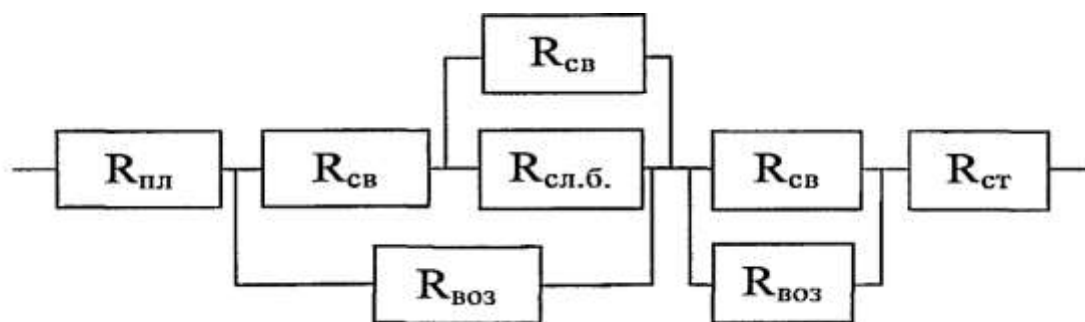


Рисунок 2.5 – Схема теплових опорів виткової ізоляції з просоченою склослюдинітовою стрічкою без повітряних включень між провідником і плівкою

Обчислювальний опір склослюдинітової стрічки з урахуванням повітряних включень буде наступним:

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

Обчислювальний опір виткової ізоляції з урахуванням повітряного прошарку між провідником і склослюдинітовою стрічкою має вигляд:

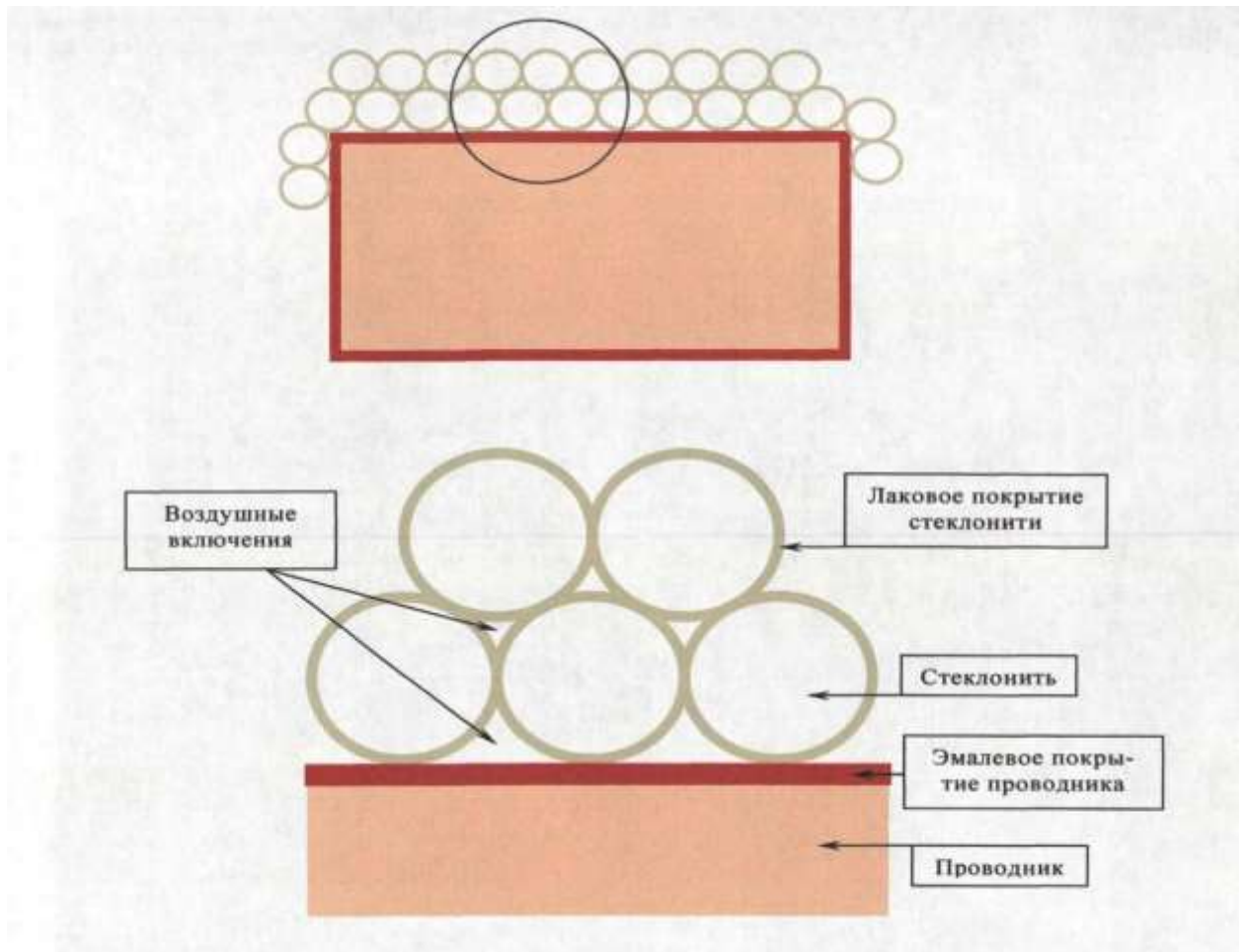


Рисунок 2.6 – Схема розташування виткової ізоляції обмотувального дроту

Добре видно: послідовність розташування електроізоляційних матеріалів на провіднику, а також наявність повітряних включень у витковій ізоляції. Ї рисунку 2.7 представлена схема теплових опорів готового обмотувального дроту.

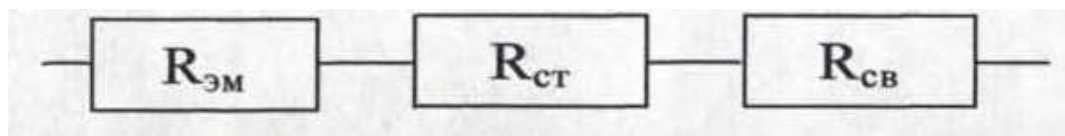


Рисунок 2.7 – Теплові опори ізоляції готового обмотувального дроту:

$R_{эм}$ – тепловий опір емалі, нанесеної на провідник в процесі виготовлення дроту;
 $R_{ст}$ – теплові опори склонитки; $R_{св}$ – тепловий опір просочувального складу (яким просочена склонитка).

Порівнюючи рисунок 2.2 з рисунком 2.6, бачимо очевидну перевагу останнього. Кількість елементів, що входять у виткову ізоляцію (рис. 2.6), складає 3, тоді як за схемою (рис. 2.2) – ця кількість дорівнює 5.

Наявність повітряних включень в обмотувальному дроті також має місце. Схема теплових опорів з урахуванням повітря представлена на рисунку 2.8.

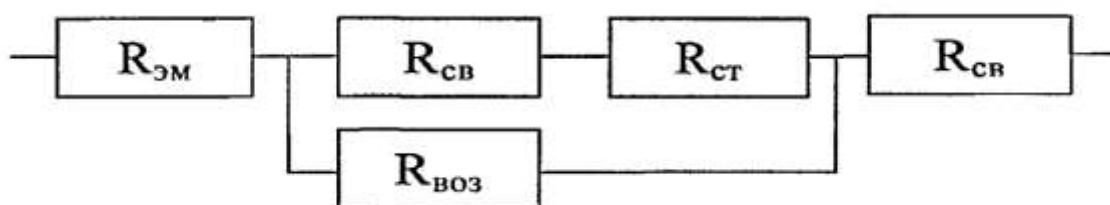


Рисунок 2.8 – Схема теплових опорів виткової ізоляції готового обмотувального дроту з урахуванням повітряних включень

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 за формулою:

$$\hat{a} \hat{e} \hat{o} \hat{y} \hat{i} \hat{n} \hat{o} \hat{n} \hat{a} . \quad (2.4)$$

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

$$\hat{a} \hat{e} \hat{o} \hat{y} \hat{i} \frac{\hat{a} \hat{i} \hat{\zeta} \hat{n} \hat{a} \hat{n} \hat{o}}{\hat{a} \hat{i} \hat{\zeta} \hat{n} \hat{a} \hat{n} \hat{o}} \hat{n} \hat{a} . \quad (2.5)$$

Нсправді 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.

де $\alpha_{\text{в}} - \lambda_{\text{в}} \hat{c}$ – тепловий опір повітря між шарами склослюдинітової стрічки.

2.3 Оузрахункля схема теплього опору пазльй ізоляцїї

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):

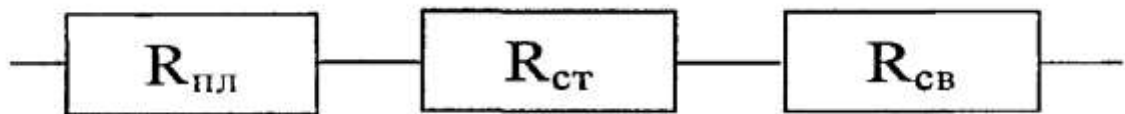


Рисунок 2.9 – Схема теплових опорів пазової ізоляції:

\hat{e} – тепловий опір полімерної плівки; $\hat{n} \hat{o}$ – тепловий опір склотканини; $\hat{n} \hat{a}$ – тепловий опір просочувального складу (яким просочена склотканина)

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

$$\hat{i} \hat{a} \hat{c} \hat{i} \hat{e} \hat{n} \hat{o} \hat{n} \hat{a} . \quad (2.7)$$

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:

$$\hat{i} \hat{a} \hat{c} \hat{i} \hat{e} \frac{\hat{a} \hat{i} \hat{c} \hat{n} \hat{a} \hat{n} \hat{o}}{\hat{a} \hat{i} \hat{c} \hat{n} \hat{a} \hat{n} \hat{o}} \hat{n} \hat{a} . \quad (2.8)$$

Ньявністю 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 теплопродієстї і компонентів, що входять в електроізоляційний матеріал і систему електричїї ізоляції

Ї прикладі просоченої склослюдинітової 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 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 вимірвальну комірку на нагрівач, згори на зразок встановлюється тепломір; 2) швидкість і нагрів нагрівача задається за допомогою регулятора температури; 3) досягнувши необхідної температури, фіксуються показання приладу в мкВ (нагрівача і тепломіра); 4) покази фіксуються за допомогою термопар,

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

розташованих усередині вимірювального осередку, контактуючих з нагрівачем і термометром; 5) обробка результатів проводилася згідно з формулами, приведеними в описі.

На рисунку 2.4.1 представлені залежності коефіцієнтів теплопровідності від температури кожного компонента, що входить в просочену склослюдинітову стрічку.

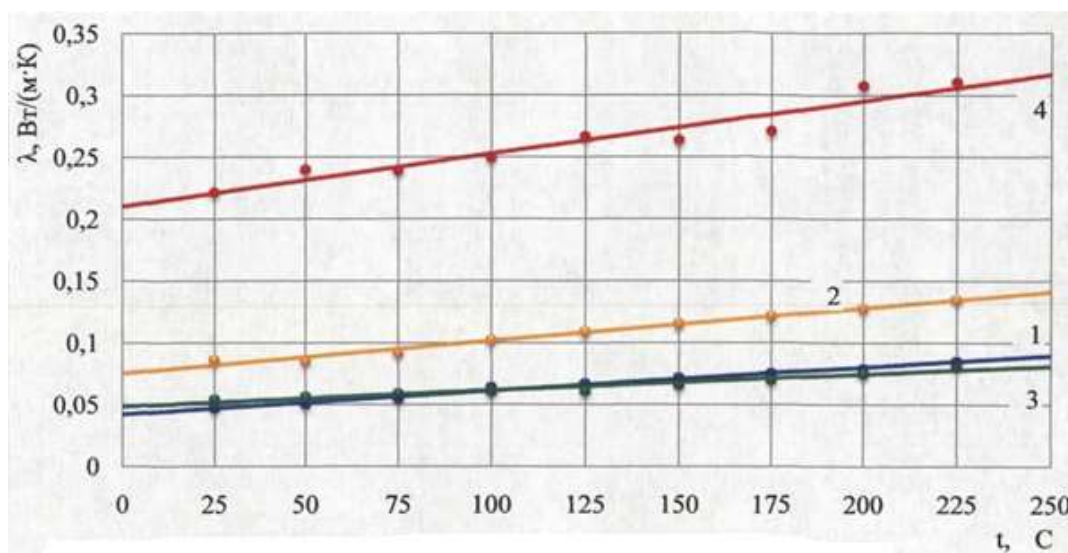


Рисунок 2.10 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури компонентів, що входять в просочену склослюдинітову стрічку:

1 – склотканина не просочена; 2 – поліамідна плівка; 3 – слюдяний папір не просочений; 4 – полімеризований компаунд Елпласт-180ІД

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 1-ій главі і пояснювалася наявністю більшої кількості повітря. Для зниження кількості повітря в пористому компоненті ізоляції, а отже, збільшення його теплопровідності, необхідно цей компонент зробити монолітним. На машинобудівних і ремонтних підприємствах для заповнення порожнеч застосовують просочувальні склади. На рисунку 2.11 представлені залежності теплопровідності від температури слюдяного паперу, просоченого компаундом Елпласт-180ІД, з подальшим підпресуванням (умовним

тиском Р) і у вільному стані порівняно з непросоченим слюдяним папером. З отриманих даних видно, що теплопровідність слюдяного паперу, просоченого компаундом Елпласт-180ІД, дещо збільшується, але наявність повітря між шарами паперу негативно позначається на значенні коефіцієнта теплопровідності композиції.

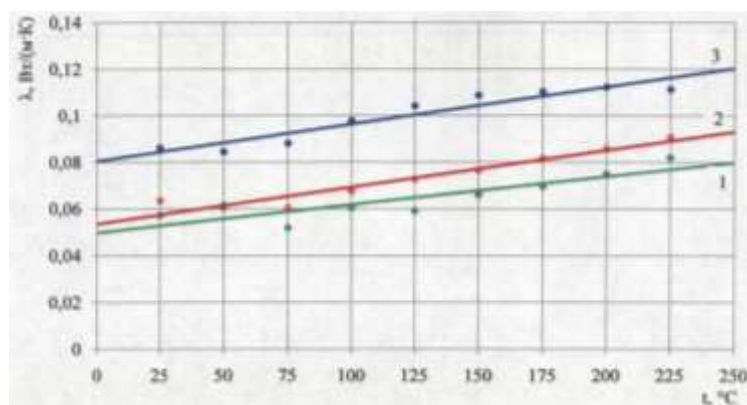


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури слюдяного паперу:

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

Більший ефект по збільшенню теплопровідності виходить у спресованій композиції з деяким зусиллям Р. Аналогічні дослідження були проведені на склотканині, вживаний в склослюдинітовій стрічці. Отримані залежності представлені на рисунку 2.12. З представлених даних також видно значне збільшення теплопровідності просоченої і спресованої склотканини. Збільшення теплопровідності відбувається за рахунок заповнення пористої структури склотканини просочувальним складом, в нашому випадку компаундом Елпласт-180ІД.

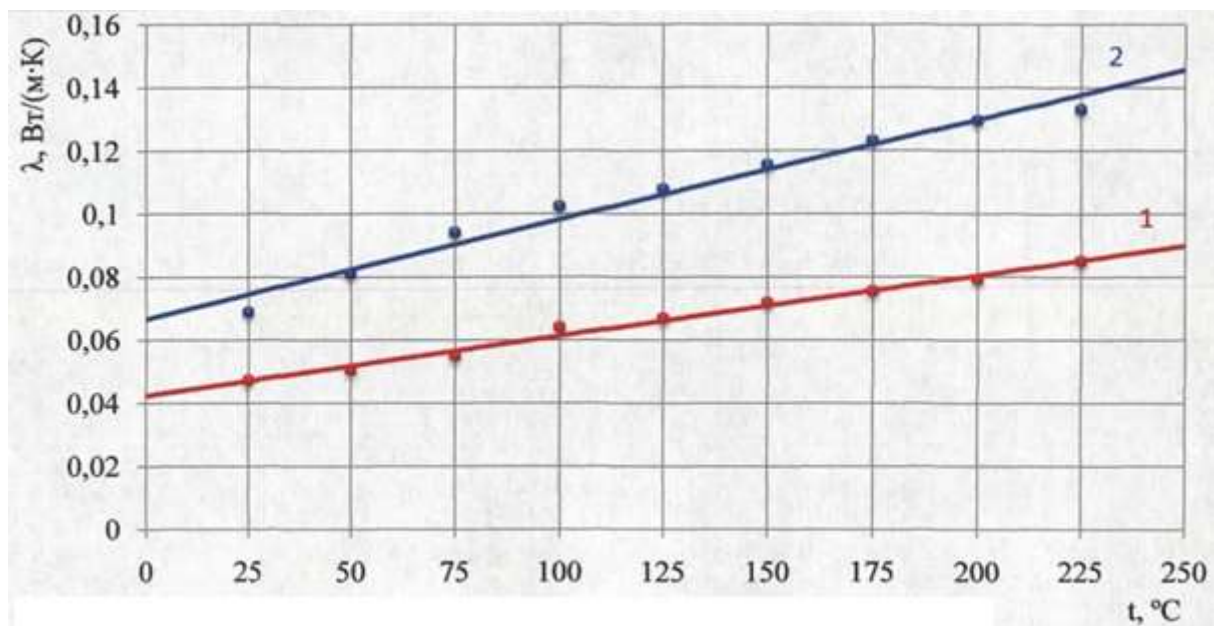


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури склотканини:

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

Порівнюючи залежності 3 і 2 (рис. 2.10 та 2.11 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.

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

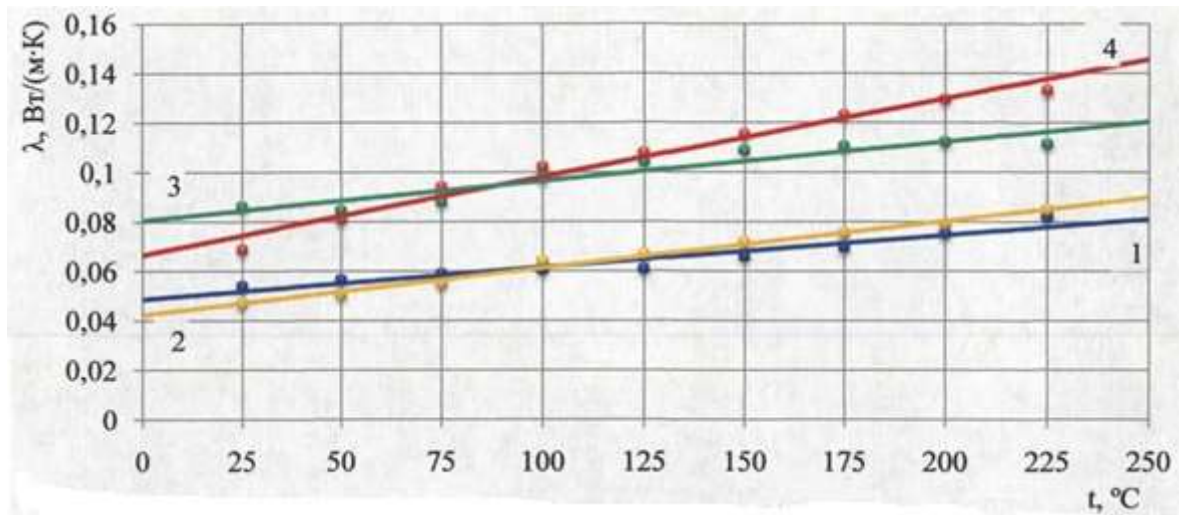


Рисунок 2.13 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури просочених та не просочених у компаунді Елпласт-180ІД с наступним опресуванням композицією:

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

Отримані залежності коефіцієнтів теплопровідності просочених матеріалів проходять дещо вище за залежностей непросочених матеріалів і повторюють характер зміни теплопровідності цих матеріалів в «сухому» (непросоченому) вигляді. Це може свідчити про те, що після просочення компаундом Елпласт-180ІД були заповнені повітряні включення. У структурі електричної ізоляції слюдяний папір є одним з основних діелектричних бар'єрів. Слюдяний папір має низьку механічну міцність і в чистому вигляді застосовуватися не може. Для збільшення її механічної міцності в склослюдинітових стрічках використовують склотканину як підкладку, яка і забезпечує механічну міцність усієї склослюдинітової стрічки, необхідну під час проведення ізолювальних робіт. Ї рисунку 2.14 представлена залежність коефіцієнту теплопровідності композиції такою, що складається із слюдяного паперу і склотканини, просоченої компаундом Елпласт-180ІД.

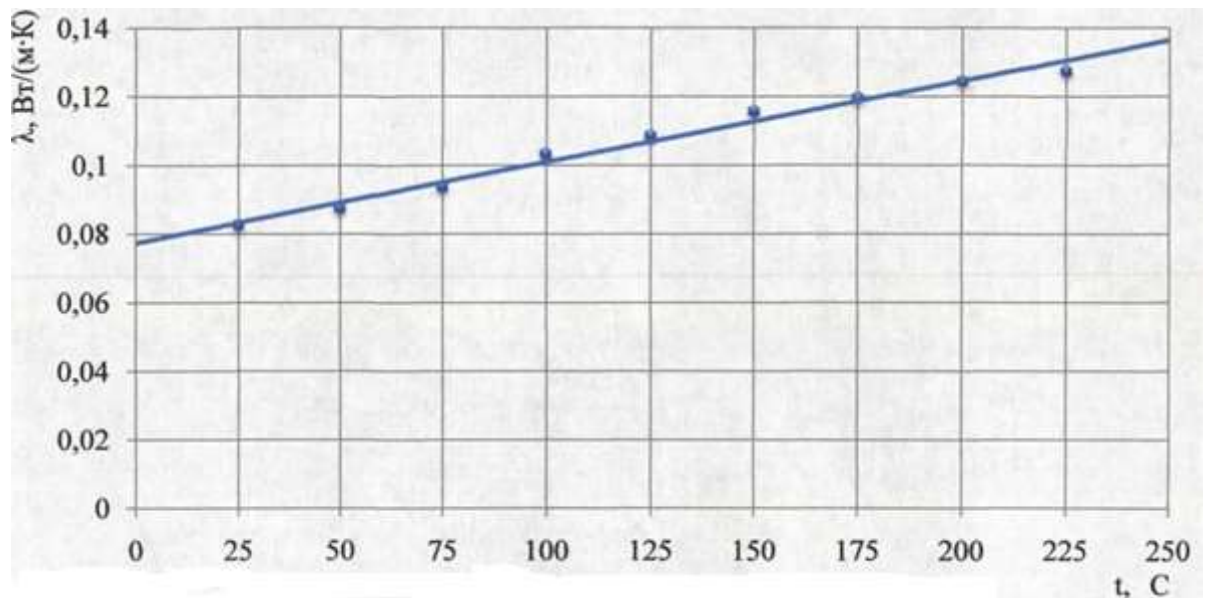


Рисунок 2.14 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури композиції (склотканина + слюдяний папір), просочений просочувальним компаундом Елпласт-180ІД та спресований умовним тиском Р

Порівнюючи отриману залежність з двома попередніми, отриманими за таких же умов термообробки і пресування, видно, що в зоні температур до 30°З теплопровідність близька до значень для композиції з просоченого і підпресованого слюдяного паперу, але дещо менше. Тобто у цьому діапазоні температур домінують теплові властивості слюди. При температурах більше 130°С теплопровідність композиції із слюдяного паперу і склотканини має значення трохи нижче, ніж отримана для композиції склотканина. У діапазоні температур від 30 до 130°С залежність трикомпонентної системи проходить дещо вище за залежності, характерні для двокомпонентних систем. Таким чином, досвідченим шляхом було показано, що монолітніша система ізоляції має більший коефіцієнт теплопровідності, має стабільніші теплофізичні характеристики. У більшості випадків для збільшення рівня пробивної напруги корпусної ізоляції використовують склослюдинітові стрічки, в структуру яких входить полімерна плівка. Для систем електричної ізоляції з класом нагрівостійкості Н і вище в якості полімерної плівки використовують поліаміди або похідні на його основі. Залежність теплопровідності композиції поліамідна плівка + слюдинітовий папір + склотканина з подальшим просоченням (зануренням і за

технологією VPI) в компаунді Елпласт-180ІД порівняно з композицією шлюдяний папір + склотканина представлені на рисунку 2.15.

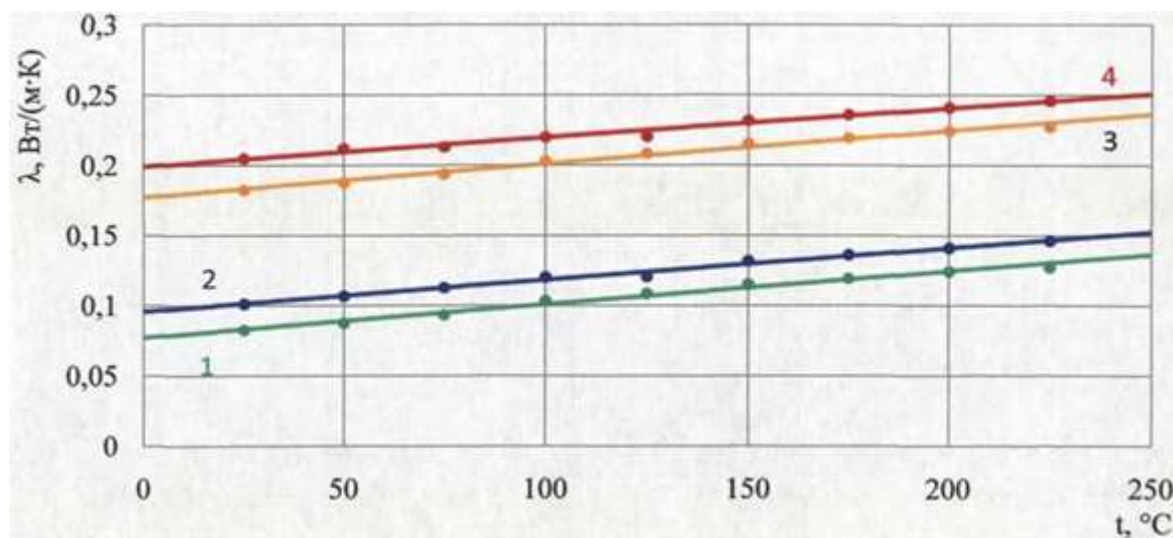


Рисунок 2.15 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури композиції, просочених різними способами компаундом Елпласт-180ІД:
 1 – склотканина + шлюдяний папір, просочені методом занурення з підпресуванням умовним тиском Р; 2 – склотканина + шлюдяний папір + поліамідна плівка, просочені зануренням з підпресуванням з умовним тиском Р; 3 – склотканина + шлюдяний папір, просочені по технології VPI; 4 – склотканина + шлюдяний папір + поліамідна плівка, просочені по технології VPI

З представлених даних видно, що композиція з поліамідною плівкою має більш високу теплопровідність порівняно з композицією без плівки. Видно значна різниця теплопровідності систем ізоляції, виконаних по різних технологіях виготовлення. При виготовленні системи електричної ізоляції методом занурення з незначним підпресуванням значення коефіцієнта теплопровідності відповідають прямим 1 і 2. Низькі значення коефіцієнту теплопровідності показують, що проникнення просочувального складу в мікропори композиції в даному випадку є скрутнішим, а за умови використання плівки, можливого при виготовленні системи електричної ізоляції за технологією VPI, відбувається глибше проникнення просочувального складу у внутрішні шари ізоляції і заповнення мікропор. Теплопровідність

значно збільшується (прямі 3 і 4). Як було вказано вище, кращу теплопровідність має система з монолітнішою структурою. Ї монолітність системи ізоляції впливає технологія виготовлення. Була отримана залежність теплопровідності пресованого матеріалу. Ї рисунку 2.16 представлений характер зміни теплопровідності склотканини (від температури) залежно від технологічної дії на її структуру після просочення наявних повітряних прошарків.

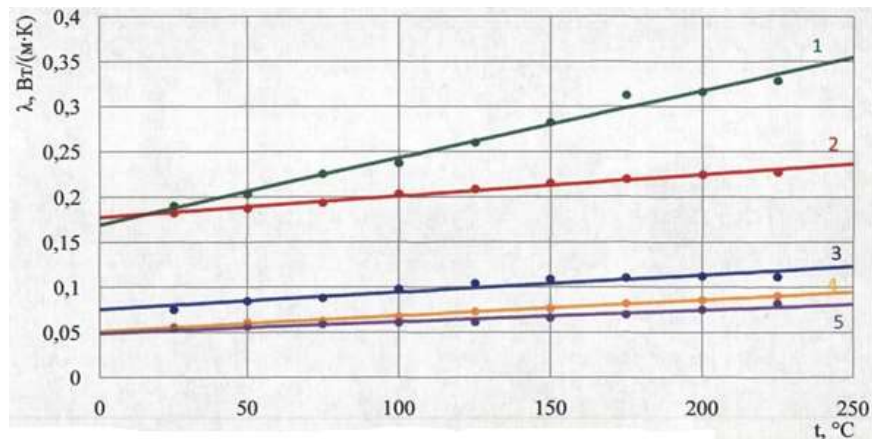


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнту теплопровідності від температури склотканини просоченої та пресованої різними способами:

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 – непросочена склотканина

Матеріал, отриманий пресуванням великим питомим тиском, має найвищий коефіцієнт теплопровідності. Такі значення виходять за рахунок дії високого тиску на матеріал. Одбувається зменшення відстані між волокнами склотканини, а отже, покращується теплопередача між ними. Для отримання монолітнішої системи електричної ізоляції і збільшення її теплопровідності (до 0,35 Вт/ (м·К) і вище) необхідно поєднати дві технології в одну – технологію вакуум-нагнітального просочення (VPI) системи (чи матеріалу) з подальшим пресуванням високим тиском. Ї сьогодні для виготовлення системи електричної ізоляції тягового електродвигуна можливе застосування тільки технології VPI із-за складності конструкції вузлів.

властивостей оптимальною є технологія вакуум-нагнітального просочення, при якій система виходить більш монолітною.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВУЗЛІВ ТЯГЛОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНЬ

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 склослюдинітових 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».

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Таблиця 3.1 – Основні характеристики просочувальних компаундів Елпласт

Найменування показника	Елпласт-155ІД	Елпласт-180ІД	Елпласт-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)	≤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. На рисунку 3.1 представлена залежність в'язкості компаунда Елпласт-180ІД від часу зберігання за певних умов.

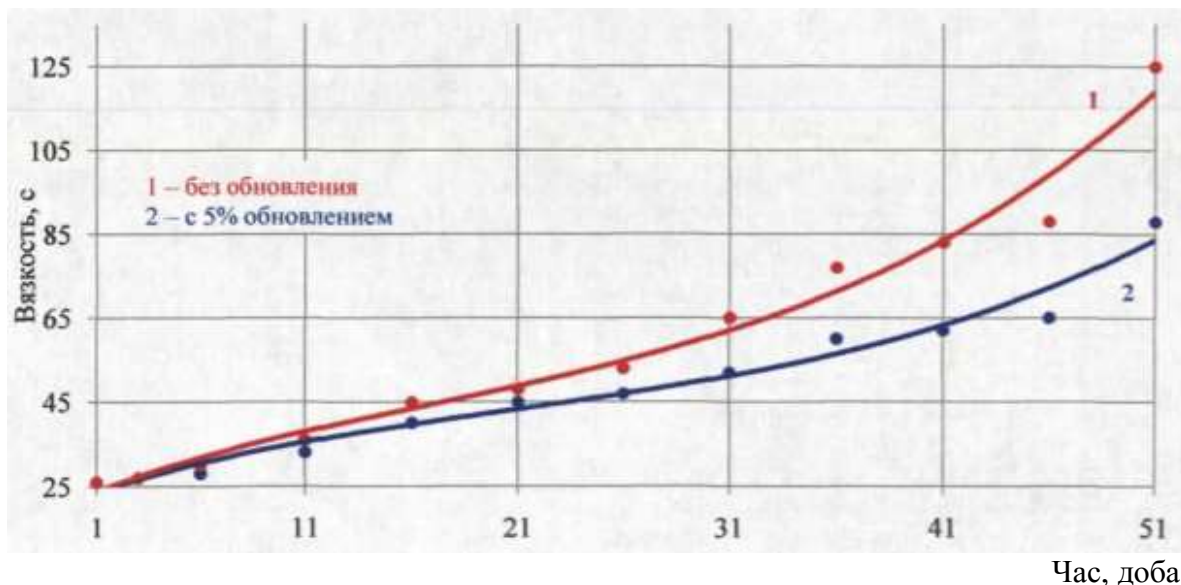


Рисунок 3.1 – Залежність в'язкості компаунда Елпласт-180ІД від часу зберігання при 50°C (по вискозиметру ВЗ-246, діаметр сопла 4 мм)

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

3.1. Дослідження плинності просочувального складу в просочених склослюдонитлих 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. Оузроблено просочення скло слюдинітової 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 постійних 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. Ї 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 судин під тиском при використанні розрахованого на високий тиск просочувального устаткування.

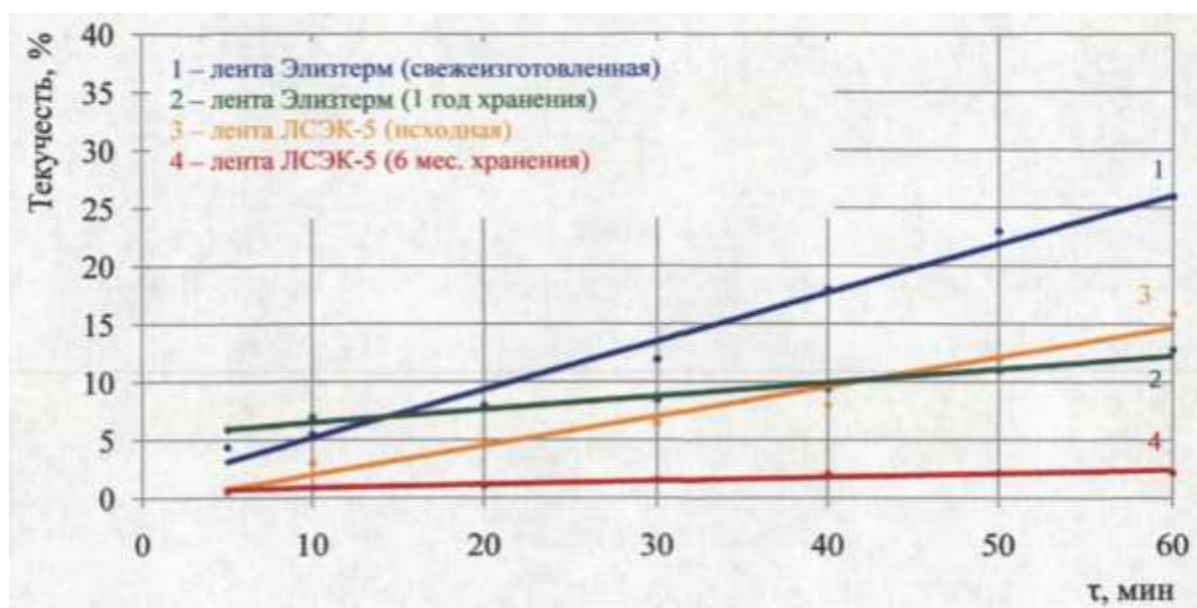


Рисунок 3.2 – Залежність плинності сполучного із просоченої слюдинітової стрічки при тиску 2 атм. і 50°C від часу опресування

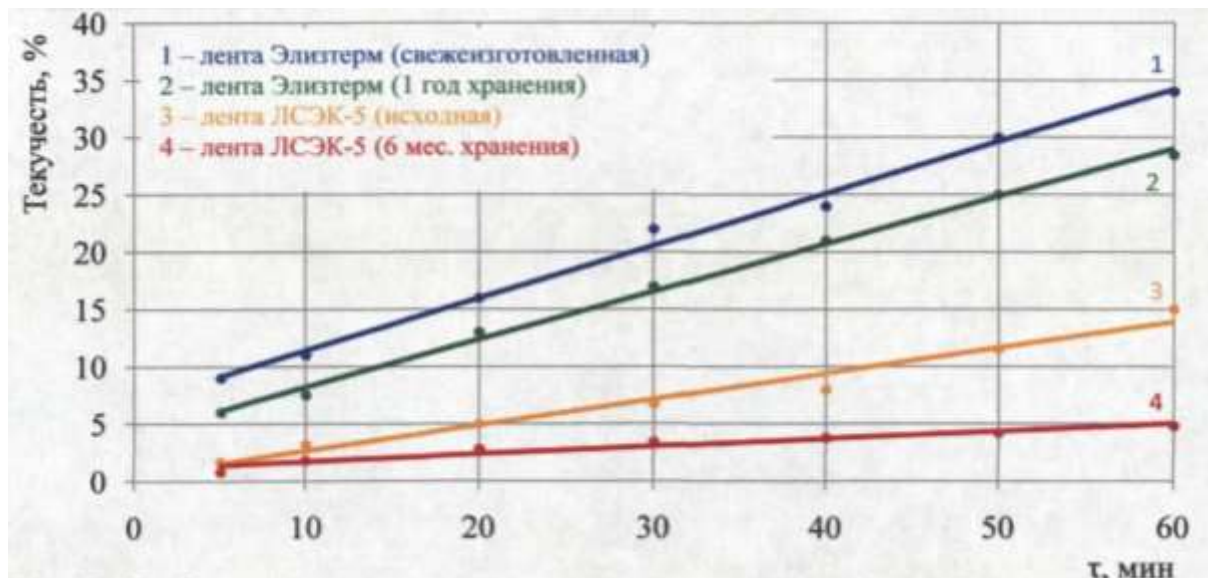


Рисунок 3.3 – Залежність пористості сполучного із просоченої склошлюдинітової стрічки при тиску 6 атм. і 50°C від часу опресування

З представлених залежностей видно, що більшою пористістю володіє сполучна (компаннд Елпласт) склошлюдинітові стрічки Елізтерм. Сполучна на основі епоксидної смоли в просочених стрічках має низьку пористість при температурі 50°C і не залежить від прикладеного тиску при пресуванні. Щодо великої пористості сполучного стрічок Елізтерм пояснюється властивостями просочувального компаннда (таблиця 3.1). При виготовленні нових просочених склошлюдинітової стрічок Елізтерм просочувальний компаннд для просочення застосовується в чистому вигляді без розчинника. Просочення відбувається за класичною схемою на мікастрічкової машині при температурі навколишнього середовища. При цьому в'язкість компаннда знаходиться в діапазоні 100–150°C по ВЗ-246 з діаметром сопла 4 мм. Полотно склошлюдинітової стрічки з нанесеним компанндом пропускають через розігріту до 70–80°C шахту мікастрічкової машини для більш рівномірного розподілу компаннда по поверхні полотна. Тобто за рахунок зниження в'язкості (до 20 з по ВЗ-246 з діаметром сопла 4 мм) компаннд рівномірно розподіляється по поверхні і більш глибоко проникає в середину стрічки. При виготовленні серійних стрічок в більшості випадків використовується просочувальний лак на основі епоксидної смоли. У чистому вигляді епоксидні смоли мають велику в'язкість при температурах 70–80°C. Просочення склошлюдинітової стрічки відбувається при температурі

навколишнього середовища. Умовну в'язкість епоксидної смоли при температурі навколишнього середовища заміряти віскозиметром неможливо. Зі збільшенням температури в'язкість знижується, але недостатньо, щоб проводити просочення склослюдинітової стрічки. Для зниження в'язкості епоксидної смоли додають різні розчинники. Після проходження лакувального валу полотно склослюдинітової стрічки проходить через обігрівач, шахту мікастрічкової машин для видалення легких (класична схема просочення). Після виходу з шахти стрічка стає більш жорсткою через підвищення в'язкості епоксидного сполучного всередині стрічки. Тим самим пояснюється різниця між плинністю сполучного в стрічці Елізтерм і в стрічках зі сполучною на основі епоксидних смол. Для підтвердження, що більш високою плинністю при низьких температурах має компаунда Елпласт в порівнянні зі сполучною на основі епоксидної смоли були зняті залежності плинності від температури на зразках нових і серійних стрічок. Їх рисунку 3.4 представлені залежності плинності просочувальних складів стрічок (Елпласт і сполучного на основі епоксидної смоли) від температури.

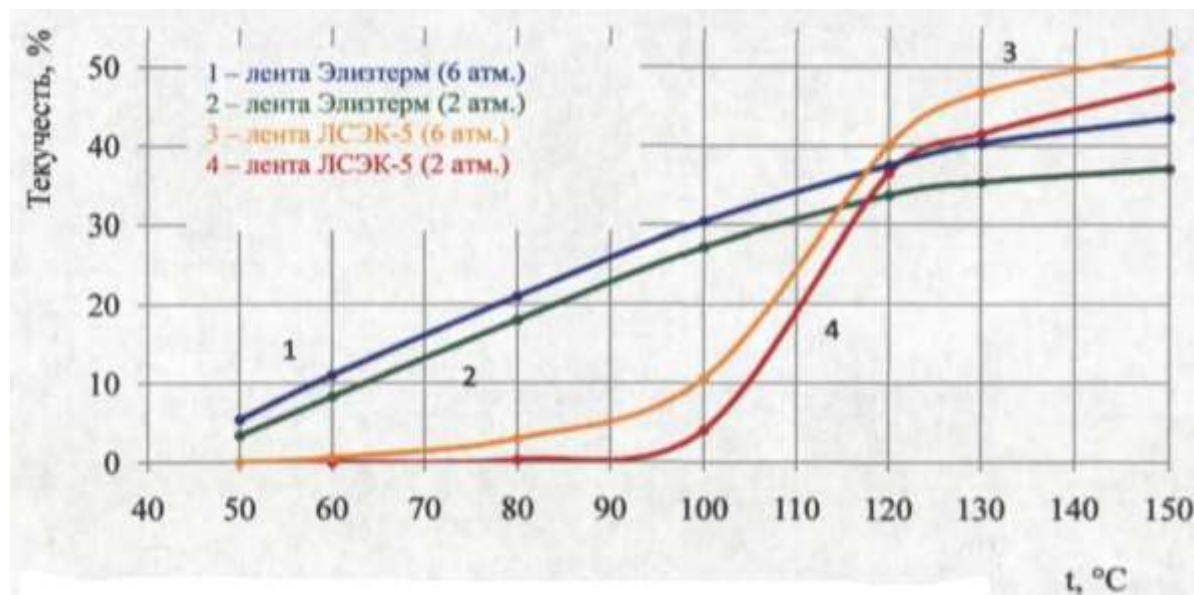


Рисунок 3.4 – Залежність плинності сполучного із просоченої слюдинітової стрічки при опресуванні протягом 5 хвилин від температури

Їх представлений залежності видно перевагу 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 того ж кількості сполучного в серійних стрічках необхідно проводити просочення при температурі просочувального складу 95–105°C, що енергетично не вигідно і не безпечно. Ї залежностях на рисунку 3.4 рухливість сполучного на основі 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 залежно плинності сполучного серійних стрічок пояснюється малим часом желатинізації. Згідно з 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 нь підстї зньчень теплопрльдієсті і плинєсті

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

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ПЕТВСД прямокутного перетину 3,55x7,10 мм. Загальна довжина моделі склала 400 мм, а довжина пазової частини - 260 мм.

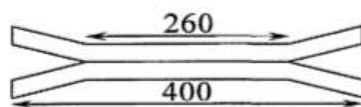
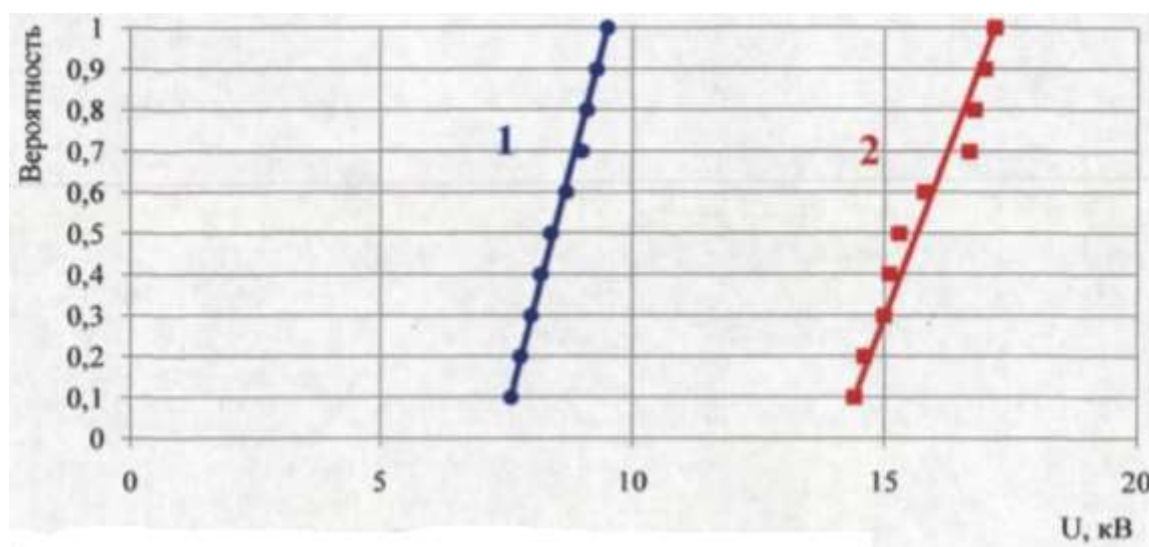


Рисунок 3.5 – Модель для визначення $U_{пр}$ між витками

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 випробувань склало 8,5 кВ. Її 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. Додаткова просочення збільшує $U_{пр}$ між витками. Її рисунку 3.6 представлено розподіл пробивної напруги між витками дроту ПЕТВСД, просоченого компаундом Елпласт (на заміну раніше застосовувалися просочувальних лаків) дроту ПЕТВСД в порівнянні з непросоченими.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

0032.180145.000.02MP.ПЗ

Арк.

64

Рисунок 3.6 – Оузподілення 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 скловолокна), після просочення вміст сполучного збільшився до 36 %. Визначення вмісту сполучного проводили методом відпалу і подальшого зважування випробовуваних зразків. Але при такому методі просочення занурення і зменшення часу сушіння якірної секції 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-18ОТІМ. Просочення даних стрічок виробляється просочувальним компаундом Елпласт-18ОІД, який володіє низькою в'язкістю і доброю плинністю в стрічках при температурах 50–70°C. Її підставі отриманих результатів по визначенню плинності просочення ізолюваних 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

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

вакуумнагнітаючому просоченні впливає на просочувальний компаунд, який, в свою чергу, обжимає корпусні ізоляцію як при гідростатичному опресуванні, що змушує сполучне, що знаходиться в стрічці, переміщатися в виткових ізоляціях проводу. Просочений таким способом якір піддається остаточній термообробці по режиму, зазначеному в технічних умовах на просочувальний склад. Проведено відповідні випробування на моделі, представленій на рисунку 3.7.

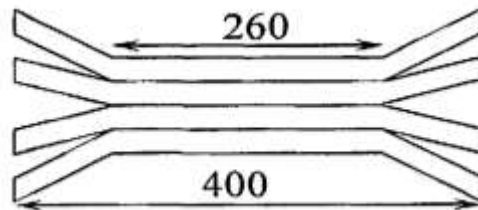


Рисунок 3.7 – Модель для визначення $U_{пр}$ між витками

Для корпусної ізоляції використовували попередньо просочену склослюди-нітову стрічку Елізтерм з вмістом в'язкості 30 %. Просочення вироблялося компаундом Елпласт-180ІД. Стрічку накладали в 5 шарів з перекриттям в половину ширини. Щоб уникнути потрапляння просочувального компаунда в виткову ізоляцію проводу з торців і підтвердити теорію міграції сполучного за рахунок його плинності, торці моделей герметизували епоксидним компаундом холодного затвердіння. Частина пазів герметизували фторопластовою стрічкою із заходом на виткову ізоляцію. Моделі просочували тим же компаундом (Елпласт) за технологією вакуум-нагнітаючого просочення (залишковий тиск при вакуумуванні 20 мм рт.ст. протягом 0,5 години, надлишковий тиск 6–8 атм. протягом 1 години). Термооброблялись моделі протягом 6 годин при 160°C.

Після просочення і термообробки було визначено $U_{пр}$ між витками і кількість сполучного в витковій ізоляції проводу. Середнє значення $U_{пр}$ за даними десяти випробувань склало 18 кВ, кількість вмісту сполучного після просочення і термообробки склало 45 %. Таким чином, на підставі поданих значень очевидно переміщення сполучного в область виткової ізоляції. Крім цього, встановлено, що підвищується теплопровідність ізоляції як між витками, так і в напрямку до корпусної

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ізоляції. Теплопровідність непросоченої виткової ізоляції (склонитки) збільшується від 0,045 до 0,09 Вт/(м·К) з зростанням температури від 0 до 225°C відповідно. Після просочення компаундом 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 проведено 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 в даний спосіб слід прийняти режим при температурі 180°C протягом 10 годин.

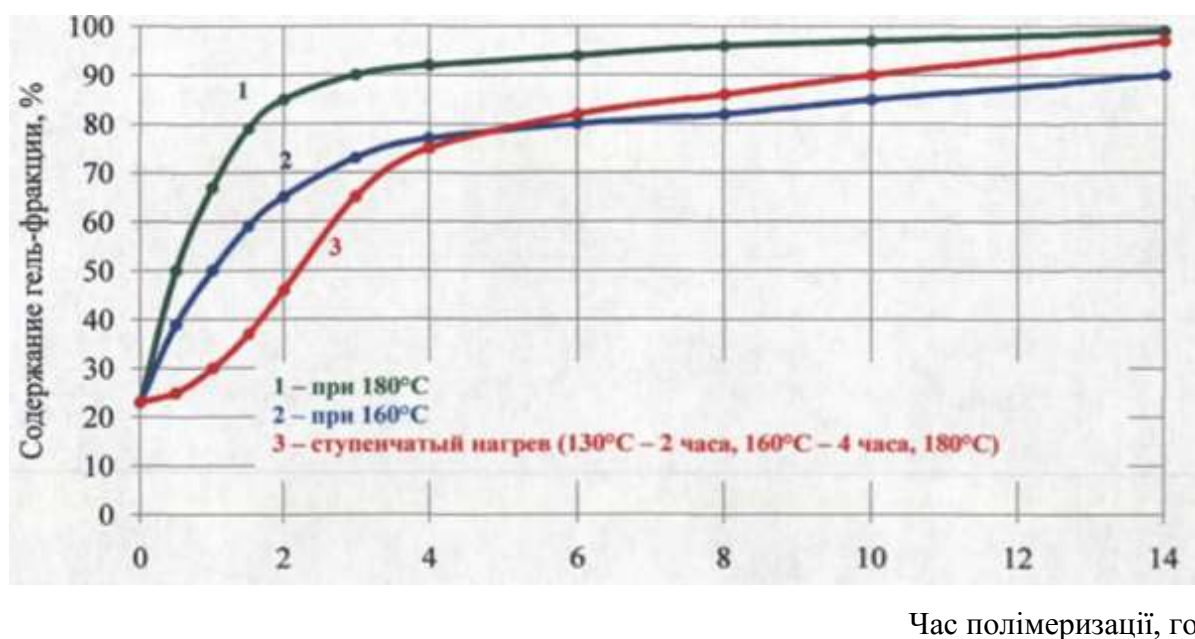


Рисунок 3.8 – Криві полімеризації (зміст гель-фракції) компаунда Елпласт-180ІД при різних умовах отвердіння

Тут при термообробці протягом 10 годин гель-фракція становить понад 95 %, що забезпечує монолітність системи електричної ізоляції, її стабільні і високі

електричні властивості. Її рисунку 3.9 представлена діаграма просочення і термообробки вузлів тягового електродвигуна з використанням нових електроізоляційних матеріалів. З представленої діаграми видно перевагу застосування нових матеріалів. Значно скорочено процес просочення і термообробки, що дозволяє знизити витрати на енергоресурси і збільшить випуск ремонтіваних тягових електродвигунів приблизно в 2,5 рази.

Також помітно збільшення пробивної напруги обпресувати ізоляції в порівнянні з не обпресованою. Випробування проводилися на макетах у вигляді стрижнів ізолюваних просоченою склослюдинітовою стрічкою Елізтерм. Її заводах з ремонту електровозів після кожної технологічної операції ізоляція піддається впливу випробувальної напруги протягом 1 хвилини. Її рисунку 3.10 представлено розподіл пробивної напруги обпресувати і не обпресованій ізоляції.



Рисунок 3.9 – Діаграма сушки, просочення та термообробки вузлів ТЕД просочених в компаунді Елпласт-180ІД в порівняння з лаком ФЛ-98

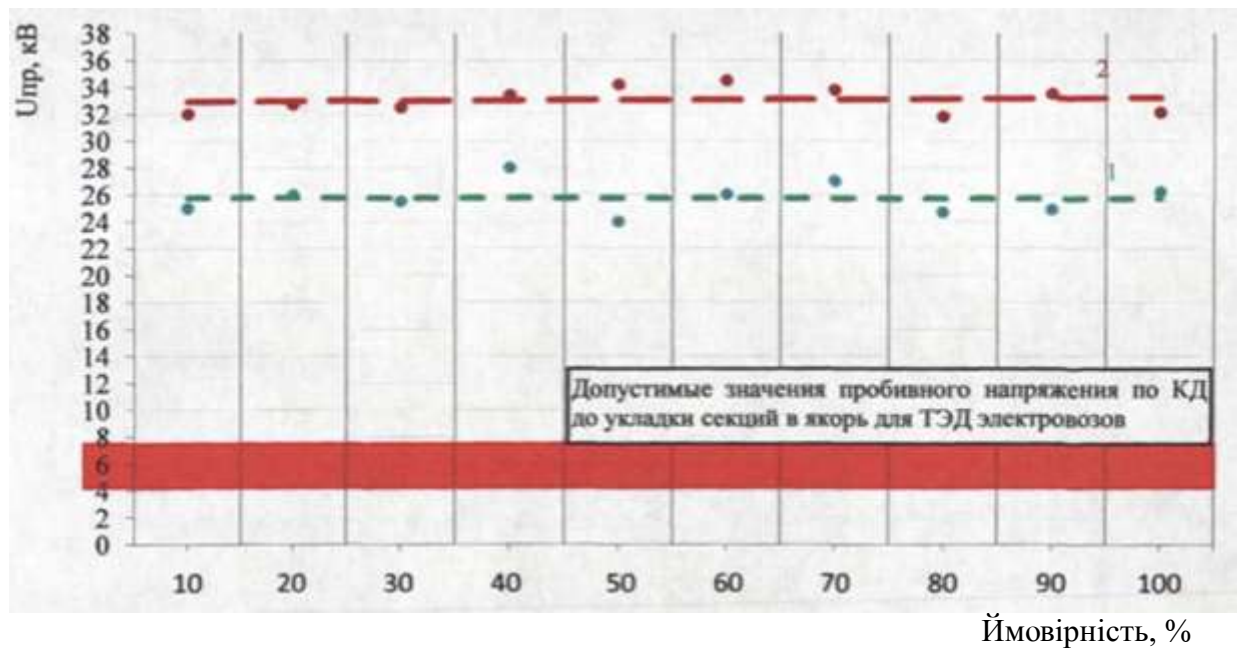


Рисунок 3.10 – Оузподілення пробивної напруги:

1 – не опресованої; 2 – опресованої

За старою технологією термообробна ізоляція піддається випробуванням напругою 9–12 кВ протягом 1 хвилини, тобто ізоляція піддається короточасному електричному старінню. Ізоляція нагрівається за рахунок великих діелектричних втрат, що виникають всередині неї. Випробування показали, що якісно ізольована, не опресована і не термообробна секція при застосуванні нових матеріалів короточасно зможе витримати випробувальну напругу до 25 кВ. Випробування з тривалою витримкою під напругою можна проводити тільки після просочення і термообробки ізоляції, при цьому зниження ресурсу ізоляції не відбувається.

Висновки до оузділу 3. Новий просочувальний компаунд Елпласт-180ІД, який використовується в нових просочених склослюдинітових стрічках Елізтерм-180-ТПМ, 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 корпусних, 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 України, при яких досягаються найкращі теплові і електричні властивості електричної ізоляції. За рахунок застосування просочувального компаунда Елпласт-180ІД і оптимізації технологічних режимів кількість просочень і час термообробки можуть скоротитися в 2,5 і більше разів в залежності від типу застосовуваного просочувального складу.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

4 ВПРЬАДЖЕННЯ ОУЗОУБЛЕНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗЬАЮЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧЬОЇ ІЗОЛЯЦЬОЇ КЛАСУ НАГРІВОСТІЙКОСТІ Н

4.1 Ньлі електроізоляцйні матеріали для вузлів тягьких електроудвиунів і модернізацй систем електричьеї ізоляцйнь їх осньлі

Для збільшення ресурсу тягового електродвигуна, його електричних і теплофізичних характеристик ЗАТ «Електроізол» розробило електроізоляцйні матеріали для кожного класу нагрівостійкості. Основні матеріали, як вже було зазначено вище, мають одну хімічну основу – олігоєфірімиди, або просочувальні компаунди з торговою маркою Елпласт. Для повної сумісності під час просочення корпусної ізоляцйї склослюдинітові стрічки просочувалися компаундом Елпласт і надалі отримали назву Елізтерм. Ї основі компаундів Елпласт і просочених склослюдинітових стрічок Елізтерм з'явилися системи електричної ізоляцйї «Термоліт» для класів нагрівостійкості F, H і C. В таблиці 4.1 представлені матеріали, що входять в систему електричної ізоляцйї Термоліт H 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 композицйї 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 непросочених або полупросочених склослюдинітових стрічок. Були розроблені рекомендацйї 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 ізоляцйї. Таким чином, для впровадження нових електроізоляцйних матеріалів була розроблена модернізована система електричної ізоляцйї класу нагрівостійкості H і представлені рекомендацйї з проведення

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

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
Міжвиткова ізоляція	Просочений композиційний матеріал Елпрег 180	1. Елпрег 180 2. Непросочений композиційний матеріал	1. Л-ПМК-Т 2. Елизтерм-180	
Корпусна ізоляція	1. ЛСЭ-ПМ 2. Елизтерм-180 3. Елпласт-180ІД	1. ЛСКН-160ТТ 2. Елпор-180 3. Елпласт-180ІД	ЛСЭ-ПМ	1. ЛСЕ-ПМ 2. Елизтерм-180 3. Елпласт-180ІД
Пазова ізоляція				Композиційні матеріали
Пазовий клин				СПП-180У СТ-ЕТФ, СТТ
Бандаж				ЛСБЕ-Н(у)
Міжламельна ізоляція колектора				КІФЕ-Н
Колекторні манжети				ФФК, ФМК
Кінці, що виводять		Склотканина ЛСКЛ		
Покриття	Покривна емаль Епімаль-9114			
Конструкційні матеріали	Склотекстоліт СТ-ЕТФ, СТТ			
Заповнення пустот	Герметик електроізоляційний ПЕ-0014			

4.2 Пръедення циклічних випоубувань системи електричїї ізоляції класу нагрівостійкості Н із застосуванням нльих електроізоляційних матеріалів

Для підтвердження та отримання офіційного підтвердження того, що система електричної ізоляції «Термоліт « Н відповідає класу нагрівостійкості, в ВЕЛНІІ проведені циклічні випробування, результати яких порівнювалися з результатами

для систем ізоляції на основі кремнійорганічного лаку і поліамідної плівки. Методика випробувань, розроблена фахівцями ВЕЛНІІ, полягає в наступному.

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 рівні 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°C протягом 10 діб з робочою в'язкістю для просочення компаунд може бути рекомендований до використання при виготовленні якорів серійних тягових електродвигунів типу НБ520.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

4.3 Оузоубка і перегляд юрмативних документів для ремонтних підприємств Укрзалізниці для застосування нльих 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 Пръедення дослідних та поумисльо-дослідних оубіт по ремонту і виготльненню тягльких електроудвигунів з модернізьяю системою електричеї ізоляції класу ньгрівостійкості Н

Вперше система електричної ізоляції була випробувана на заводі Електротязмаш. 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 дослідних робіт технологічне обладнання заводу дозволило провести просочення вузлів тягового двигуна НБ-418кб при надлишковому тиску понад 5 атм. У той же час бак з компаундом має водяний обігрів, що дозволило добитися мінімальної в'язкості компаунда і тим самим глибокого його проникнення у внутрішні шари ізоляції. Ї

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

відформовані з дроту ПЕТВСД зрівняльні котушки вручну наносили просочену склослюдінітову стрічку Елізтерм-180ТПМ 0,1x20. Її відформовані з дроту ПЕТВСД якірні котушки вручну наносили на задні і передні лобові частини стрічку Елізтерм-180ТПМ 0,1x20 по 4 шари в півнахлесту. Її пазову частину стрічку наносили на стрічкоізолюючому верстаті. Поверх основної ізоляції завдали покривну ізоляцію зі склострічки ЛЕС 0,1x20. Перед укладанням в якір всі котушки піддавалися випробуванням. Підготовлений для укладання якір ізолювали з обох сторін пазової частини полотном Елізтерм-180ТПМ 0,13x135 і Елізтерм-180ТПМ 0,13x240. Вистилання паза виробляли композиційним матеріалом Імідофлекс 292-0,17. Як міжплощинну ізоляцію застосовували склопленкослюдопласт 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 сек. по ВЗ-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.

Таблиця 4.2 – Результати випробувань опору ізоляції

№ якоря	Опір якоря, МОм	
	100°С	20°С
557А	3	>1000
1914	5	>1000
295	4	>1000
328	4	>1000

875	5	>1000
108	4	>1000
1076	3	>1000
658	4	>1000

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:

- на підготовлену мідну котушку з дроту ПММ завдали 1 шар склострічки ЛЕС 0,1x20 півнахлесту;
- поверх стрічки ЛЕС завдали 4 шари стрічки Елпор-Пл 0,13x30 півнахлесту;
- поверх корпусної ізоляції завдали шар склострічки ЛЕС 0,1x20 (покривна ізоляція для захисту від механічних пошкоджень) і шар фторопластовою стрічки в розбіг (для утримання компаунда всередині ізоляції після просочення під час термообробки).

Підготовлену до просочення котушку розігріли до 60–70°C. Завантаживши розігріту котушку в автоклав, провели вакуумування 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 сек. По ВЗ-4 при температурі 35–45°C). Просочену котушку поміщали в сушильну піч та при термообробці протягом 10 годин при 180°C, після чого відправляли котушки на контрольний пробій напругою 8,0 кВ. Компенсаційні котушки ізолювали просоченою склослюдинітовою стрічкою Елізтерм-180ТІМ 0,13x20 три шари півнахлесту. Поверх основної ізоляції завдали покривну ізоляцію з склострічки ЛЕС 0,1x20. Всі котушки перед складанням в остов покрили електроізоляційною емаллю «Епімаль-9114». Висновки, зроблені заводом, такі:

1. 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.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

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

3. 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 бандажа, 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 ВЛ-80. Ї сьогоднішній день даний електровоз пройшов більше 500 тис. км, зауважень під час експлуатації не надходило. Ї підставі розробленої технологічної інструкції ТІ 103.11.483-2007 і переглянутої конструкторської документації «Тяговий електродвигун постійного струму ТЛ-2К1 ТЕ.155.034РСБ-Н» були розпочаті 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 4.3 – Перегріву ізоляції ТЕД ТЛ-2К1 із системою класу нагрівостійкості F, отримані на випробувальній станції

№ остова	№ якоря	ÿ ê °C	ã ĩ °C	ÿ ê °C
368	458	118	117	121

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

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

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

№ остова	№ якоря	ÿ ê °C	ã ï °C	ÿ ê °C
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 пробоїв є немонолітні ізоляції.

З даних таблиці 4.4 помітно, що перегриви менш високі в порівнянні з системою ізоляцією класу нагрівостійкості F і двигуни мають значний запас для експлуатації по класу нагрівостійкості Н. Значення, що не перевищують 120°C, пояснюються більш монолітною ізоляцією.

Висновки до розділу 4. Система ізоляції Термоліт Н була випробувана на ряді ремонтних підприємств ПАТ "Укрзалізниця", де отримала схвальні відгуки. Для отримання найкращих електрофізичних і теплових характеристик ремонтованих ТЕД необхідно провести технічне переозброєння на ремонтних підприємствах ПАТ Укрзалізниця.

ВИСНЬКИ

Застосування сучасних вітчизняних компаундів Елпласт та матеріалів на їх основі дозволяє змінити технологію ремонту і просочення вузлів тягових електродвигунів, скоротити режими термообробки і поліпшити ряд електрофізичних показників. В ході вирішення наукових, технологічних і експлуатаційних проблем у магістерській роботі досягнуті наступні результати:

1. Оузроблено нові електроізоляційні матеріали та компоненти на їх основі для модернізації системи електричної ізоляції для тягових електродвигунів.

2. Вивчено електричні, теплові та технологічні властивості матеріалів, які входять в модернізовану систему електричної ізоляції тягових електродвигунів і системи в цілому.

3. Отримані значення коефіцієнтів теплопровідності і їх залежності від температури в діапазоні температур від 0 до 250°C для компонентів модернізованої системи електричної ізоляції тягових електродвигунів.

4. Запроваджено нову технологію просочення з оптимальними режимами і застосуванням нових просочувальних компаундів при ремонті тягових електродвигунів, яка забезпечує: просочення виткової ізоляції; поліпшення параметрів електричних і теплофізичних властивостей; заданий експлуатаційний ресурс двигуна в 1,5 млн. км або 20000 годин.

					0032.180145.000.02MP.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Proc. 6-th Electr. Insulat. Conf. (1965, USA, New York) p.82-84, 95-97.
2. "Insulation", 1969, vol. 15, № 7, p. 48-52.
3. Электродвигатели для прокатных станков МЗЗ: Каталог / General Electric Co. - ДК №3898-68-1 (США).
4. "Kapton doubled mileage on rebuilt traction motors", Du Pont, Cast history of "Kapton", Wilmington, DE, 19898, NA-70070.
5. "Insulation/Circuits", 1971, vol.17, № 3, p. 21-22.
6. "Подводный Oiline прочный внутрискважинный насос" — Проспект / Oiline - 1973 (США).
7. "Toshiba Rev.", 1968, vol. 23, № 8, p. 976-981.
8. Proc. of 10-th Electr. Insulat. Conf. (1971 USA, Chicago)p. 163-165, 360-362.
9. "Elektr. Mashinen", 1972, Bd 51, № 15, s. 140-141.
10. "Reduction du cout de reparation des moteurs de traction des chemins de PER suisses", "Du Pont de Nemours International S.A., 24.07.72".
11. "Elletrificazion", 1971, № 12, p. 622.
12. "Electr. Rev.", 1970, vol. 187, № 24, p. 839-843.
13. "Traction Motors upgraded with Kapton insulation", Du Pont, Case history of "Kapton", Wilmington, DE, 19898, NA- 75980.
14. "Elektro Anzeiger", 1973, Bd 26, № 18, s. 367.
15. "Elektrotechnik", 1970, Bd 52, JVb 5, s. 22-23.
16. "Brown, Boveri", 1972, № 10/11 s. 514-525. 18. "ACEC Revue", 1972, № 2, p. 39-42.

					<i>0032.180145.000.02MP.ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		80