

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кафедра «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

«Технологія просочування краплинним методом та розрахунок режимів
термообробки просочених обмоток при струмовому нагріві»

з дисципліни:

«Виробництво електричних машин»

Харків 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОПИС ТА ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ ПРОСОЧЕННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	4
1.1 Теоретичні положення.....	4
1.2 Порівняння трьох способів просочування обмоток ЕМ: зануренням у ванну, у вакуумі під тиском і краплинного	10
2 РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ І ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СТРУМЕНЕВОГО ПРОСОЧУВАННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА.....	20
2.1 Вихідні дані до розрахунку	20
2.2 Розрахунок струмового нагріву при реалізації його на автоматизованій просочувальній установці	21
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28

ВСТУП

На протязі роботи електричної машини, її обмотка схильна до псування та зносу, через дії на неї різних чинників. Одним з можливих вирішень цієї проблеми є просочення обмотки.

Сутність процесу просочення полягає у видаленні вологи з пір ізоляційних матеріалів, заповнення рідким лаком і подальше сушіння лаку до затвердіння. Це дозволяє значно продовжити термін експлуатування обмотки та збільшити стійкість до зовнішніх негативних чинників.

Відомо багато способів просочення, які зараз використовуються на виробництвах. Вони відрізняються обладнанням, котре потрібно використовувати у роботі, якістю готового продукту, часом проведення технічного процесу. В залежності від типу машини та її габаритів використовують різні способи.

У цій роботі наведено порівняння декількох методів: їх позитивні негативні риси; обладнання, котре застосовується у процесі; опис матеріалів, які застосовуються для просочення; основні етапи ті ідеї виробництва. Більш детально описаний крапельний метод просочення, який являється оптимальним по часу, якості, реалізації. Як правило, його застосовують для машин невеликої потужності.

Також проведений розрахунок режиму та параметрів процесу просочення одного з варіантів обмотки. При розрахунку використовується застосування просочувальної установки УПС-4 та просочувального матеріалу КП-34.

1 ОПИС ТА ПОРІВНЯННЯ СПОСОБУ ПРОСОЧЕННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

1.1 Теоретичні положення

В процесі роботи електричної машини, на неї діють різні чинники, що призводять до її псування: вібрації, висока температура, вологість. Надійність роботи електричної машини залежить від ізоляції обмоток, яка в свою чергу визначається якістю застосованих матеріалів та правильного просочування обмотки.

Просочуванням – називають процес заповнення обмотки та її ізолювання спеціальними сумішами з подальшим запіканням [1]. Повітряні проміжки та порожнини які знаходяться в обмотці заповнюються лаками, рис.1.1. Завдяки просочуванню в електричній машині можливо позбавитися від багатьох негативних факторів, та покращити надійність роботи.

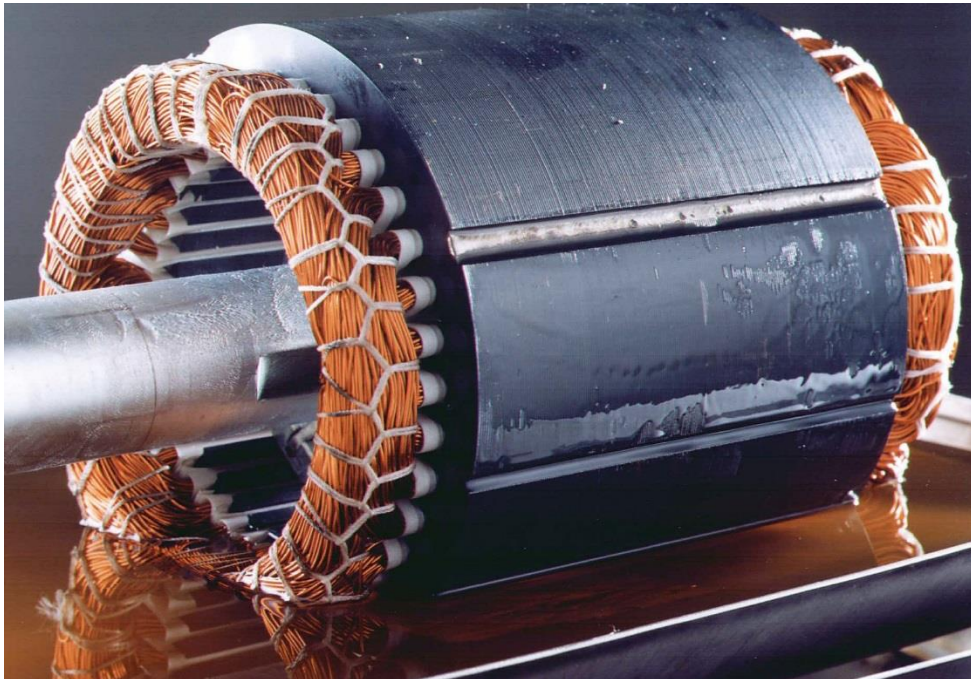


Рисунок 1.1 – Приклад статора асинхронного двигуна обмотка якого піддається просочуванню

При виготовленні різного роду обмоток дуже важливе місце посідають процеси сушки та просочування, завдяки яким ізоляція обмоток отримує потрібні від неї якості [1].

Бавовняна ізоляція до просочування має доволі низькі ізоляційні якості, через те що вона дуже добре поглинає вологу з повітря. Але в зволоженому виді така ізоляція перетворюється в напівпровідник. Навпаки, при просочуванні бавовняні матеріали отримують настільки високі ізоляційні якості, що навіть після перебування у приміщенні з підвищеною вологістю повітря зберігають опір ізоляції.

Просочування обмотки дозволяє вирішити проблему переміщення провідників у пазах осердь. Підвищується механічна міцність ізоляції, так як просочена обмотка має добре зцементовані витки, що щільно і міцно сидять в пазах осердь. Завдяки цьому запобігається переміщення провідників у результаті вібрації та пов'язане з цим пошкодження ізоляції від стирання.

Значно підвищується електрична міцність ізоляції, так як електрична міцність просочувальних матеріалів вище за електричну міцність повітря, що знаходиться між волокнами непросочених матеріалів.

Підвищується вологостійкість ізоляції, особливо волокнистої, через зменшення гігроскопічності в результаті заповнення пір та створення лакової плівки, що перешкоджає проникненню вологи всередину обмотки.

Покращується теплопровідність обмоток за рахунок зменшення повітряних прошарків між провідниками та стінками паза осердя.

Для всіх технологічних процесів і для процесу просочування, зокрема основними вимогами, є простота реалізації, забезпечення необхідної якості й мінімальна трудомісткість.

Технологічний процес просочування обмотки включає операції:

- 1) сушіння перед просочуванням;
- 2) просочування лаками або сумішами;
- 3) сушіння після просочування для видалення розчинників;
- 4) запікання твердої основи.

Вибір електроізоляційних лаків або компаундів для тієї або іншої конструкції ґрунтується на знанні технічних вимог для заданої конструкції й умов її роботи, на фізичних і електричних характеристиках лаків і компаундів, що визначаються відповідними стандартами й технічними умовами [2]. Окрім необхідних фізико-хімічних властивостей, просочувальний матеріал має бути простим у використанні та економічно доцільним.

Існують два види просочувальних матеріалів: *лаки* та *компаунди* [1], [3].

Просочувальний лак складається з твердої основи і розчинників. Зазвичай мають високі електроізоляційні властивості та забезпечують хороший захист від вологи та корозії. Лаки, які використовуються для просочування обмотки ЕМ, за складом поділяються на: синтетичні (з урахуванням полімерів штучного походження); природні (з урахуванням смол природного походження).

Лаки на основі смол природного походження у минулому використовувалися повсякденно, але на сьогодні застосовуються доволі рідко. Використання такого матеріалу забезпечують ті ж експлуатаційні якості, що і синтетичні, проте коштують дорожче.

Синтетичні лаки мають чудову цементуючу здатність і якість затвердіння в товстих шарах. На ринку представлені дуже різноманітні суміші, більше десятка марок, і відрізняються вони експлуатаційними якостями та сферами застосування. Як приклад можна навести лак КО-916А, рис. 1.2.

Компаунди – просочувальні та заливальні матеріали без летучих розчинників, які використовуються для заливання, герметизації електричного та електронного обладнання. Вироби з ізоляцією з компаундів мають високу вологостійкість, вібростійкість, тепловіддачу, підвищену пробивну напругу [3].

Як приклад, можна навести компаунд КП-34 ТУ 16-504.014-77. Він являє собою композицію з олігоєфіракрилатів і кремнійорганічних смол, модифікованих цільовими добавками. Застосовується для просочення обмоток електричних машин і апаратів, трансформаторів у тому числі вологостійкого і тропічного виконання. Він рекомендується для просочення намотувальних виробів (високово-

льтних трансформаторів, тощо). Висока цементуюча здатність обумовлює застосування для обмоток, що обертаються, схильних до великих відцентрових зусиль. Рекомендується для просочення на автоматичних струменевих (краплинних) установках.



Рисунок 1.2 – Лак електроізоляційний КО-916А

Лаки і розчинники токсичні і пожежонебезпечні, тому їх зберігають у спеціальних приміщеннях, обладнаних вентиляцією і необхідними засобами пожежогасіння, при оптимальній температурі 25 ° С.

Перед просочуванням обмотку піддають попередньому сушінню для видалення вологи з ізоляції обмотки, а також зняття внутрішніх напруг у емалевій ізоляції провідників. Крім того, попереднє сушіння прискорює процес твердіння клеючого лаку в ізоляційних матеріалах, що зберігає їх від розшарування.

Тривалість сушіння залежить від температури, хімічного складу й фізичних властивостей ізоляційних матеріалів, конструкції ізоляції, ступеня зволоження й способу сушіння.

Для сушіння обмоток електродвигунів застосовуються різні методи сушіння обмоток електричних машин:

1) струмове сушіння. Переважно використовується змінний струм. Цей спосіб є найбільш ефективним.

2) нагрів з використанням вакууму в початковий період. Завдяки цьому не утворюється лакова плівка, температура 70 °С - 80 °С.

3) терморадіаційний. Така сушка заснована на обігріві деталей променистою енергією, що випромінюється розпеченими тілами. Перевагою цього способу є те, що промені доходять до виробу практично без втрат. Але є недолік – мала проникаюча здатність променів.

4) газові сушильні камери. Переваги: дешевий вид палива, легке регулювання температури.

5) сушіння струмами високої частоти (індукційні печі). Для нагрівання виробів використовують явище магнітної індукції.

Вибираємо струмовий спосіб, для якого застосовуються спеціальні печі, рис. 1.3. Піч сушильна, призначена для цих цілей, повинна володіти функціями примусової вентиляції та електричного нагріву [1]. Необхідні також спеціальні візки, на яких виріб подаватимуть в піч.

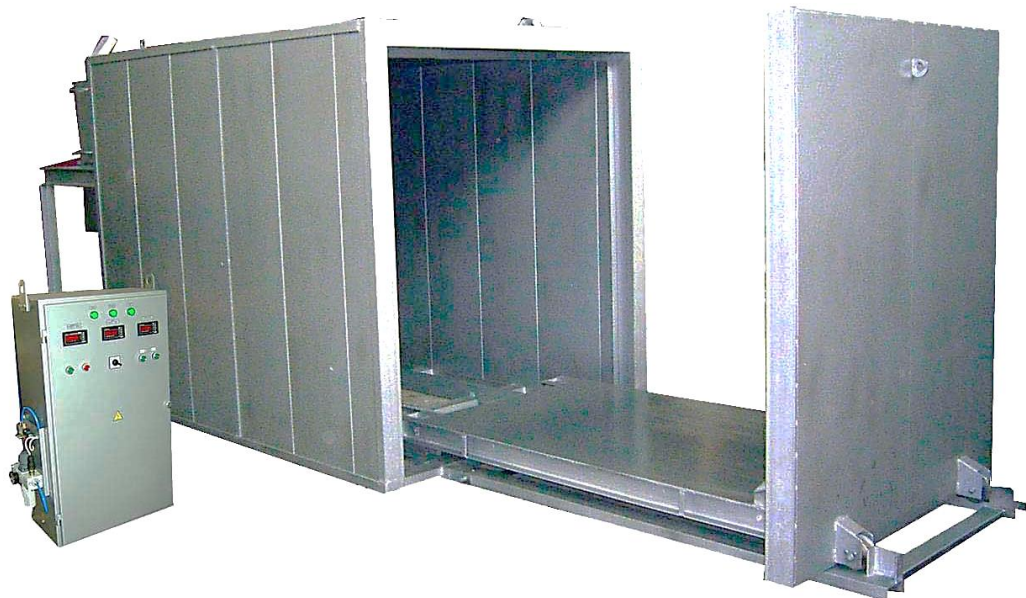


Рисунок 1.3 – Установка сушильна електрокалориферна тупикова

Для контролю температури в печі, а також виробів, що знаходяться в ній, встановлюють спеціальні термомпари.

Для сушіння обмоток електродвигунів потужністю до 250 кВт використовується сушильна піч зі спіральними електронагрівачами або ТЕН. Температура в камері може досягати 400 °С. Підтримка температури на заданому рівні здійснюється в автоматичному режимі із завданням графіку нагріву.

Сушильна піч повинна відповідати певним вимогам для того, щоб видалення вологи вироблялося якісно. Робоча температура має лежати в інтервалі 90 °С - 20 °С. Паливом для печі може виступати: електрика, пара, природний газ, дизельне паливо. Цей прилад може бути як періодичної дії, так і безперервної. Останній широко використовується у автоматичних лініях.

Сушильна піч нагріває повітря непрямим шляхом через особливий теплообмінний блок. Існує можливість простого переведення печі з газу на дизельне паливо за допомогою заміни пальника.

Сушіння обмотки перед її просочуванням можна не проводити у тому випадку, коли обмотка виконана з вологостійких матеріалів – емальованих провідників або провідників із скловолокнистою ізоляцією, а пазова ізоляція – із склотканини або подібних до неї негігроскопічних електроізоляційних матеріалів.

Сушіння обмотки після просочування має на меті випаровування розчинника, затвердіння та полімеризацію просочувального складу, [1]. Час сушіння обмоток залежить від конструкції та матеріалу обмотки, габаритів виробу, властивостей просочувального лаку, вмісту в ньому плівкоутворювального та розчинника, від температури сушіння, циркуляції повітря в сушильному пристрої та його теплової потужності. Для зменшення часу, необхідного для розігріву обмоток і вузлів бажано завантажувати їх нагрітими до оптимальної температури в печі.

На початку сушіння температура встановлюється невелика 60 °С - 70 °С, для видалення легколетких розчинників. При більш високих температурах відбудеться утворення затверділої поверхні лаку.

Другий етап сушіння температура обирається у діапазоні 120 °С - 130 °С, а для теплостійкої ізоляції 150 °С -170 °С. При цьому забезпечується повне затвердіння та полімеризація лаку.

Сушіння вважається закінченою, коли лак утворює тверду блискучу плівку.

Зараз на виробництві для заповнення пор та пустот в обмотках використовують наступні способи просочування обмотувальних вузлів [1], [4]:

- 1) просочування зануренням;
- 2) просочування у вакуумі й під тиском;
- 3) просочування струминним (краплинним) способом.

1.2 Порівняння трьох способів просочування обмоток ЕМ: зануренням у ванну, у вакуумі під тиском і струминний

Просочення зануренням у ванну полягає в тому, що обмотувальний вузол, що просочується, занурюють у ванну з лаком, і лак під дією гідростатичного тиску і капілярних сил проникає в обмотку, витісняючи повітря, що міститься в просторі між провідниками [1]. Потім обмотковий вузол витягають із ванни і після стікання надлишків лаку сушать.

Процес просочення зануренням у ванну складається з наступних операцій:

1. Сушіння перед просоченням;
2. Просочування зануренням;
3. Стікання надлишків лаку;
4. Прибирання поверхонь обмотувального вузла, де присутність лаку є неприпустимим при подальших технологічних операціях;
5. Сушіння та запічка.

Спосіб просочення зануренням у лак став найбільш поширеним. Цей спосіб є гнучким технологічним процесом, що дозволяє на одному обладнанні просочувати вироби різних розмірів та конструкцій. Його застосовують як для просочення окремих котушок, так і обмоток, покладених у пази осердь. Принципова ідея проілюстрована на рис. 1.4

Після сушіння перед просоченням обмотувальний вузол охолоджують до температури $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Така температура обмотки сприяє кращому проникненню в нього лаку. Режим просочення залежить від конструкції обмотувального вузла та типу лаку. Осердя з обмоткою намагаються встановити так, щоб не пошкодити обмотку і водночас вільно виходило повітря з неї, без утворення повітряних мішків. Для цього прагнуть розташувати вісь осердя під кутом 15° - 20° до горизонталі. Вивідні кінці обмотки намагаються розташувати вгору так, щоб при просоченні вони не занурювалися в лак. Піддон із осердям опускають у ванну до тих пір, поки рівень лаку не стане вищим за осердя з обмотками на 30 мм – 60 мм .



Рисунок 1.4 – Занурення статора АД у ванну з лаком

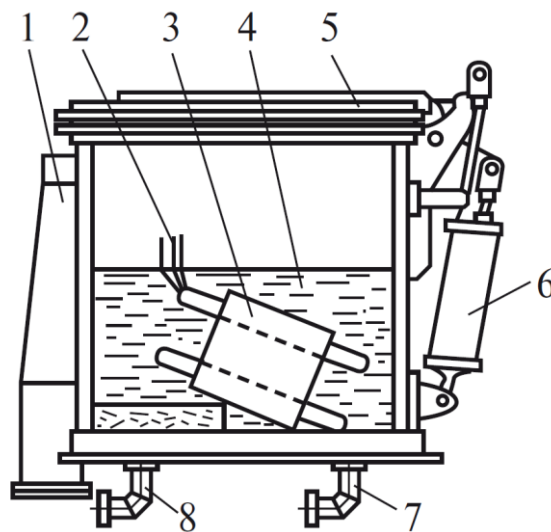
Занурену в лак обмотку витримують до припинення виділення повітря з обмотки (доки зникнуть бульбашок повітря), але не менше 20 хв. Тривалість процесу просочення попередньо нагрітих обмоток може коливатися від 20 хв до 30 хв, а холодних обмоток від 25 хв до однієї години.

Після закінчення просочення піддон піднімають з лаку і витримують над ванною протягом 15-30 хв для вільного стікання надлишків лаку при температурі

18 °С -20 °С. Іноді для прискорення стікання лаку обмотка нагрівається до температури, що не перевищує температури кипіння розчинника. Після цього просочене осердя з обмотками виймають з піддону і встановлюють на стіл з витяжною вентиляцією для прибирання поверхонь, де присутність лаку неприпустима при подальших технологічних операціях. Такими поверхнями є зовнішня посадкова поверхня осердя в корпус і внутрішня поверхня розточування осердя. Очистку роблять розчинником лаку.

Після просочення проводять сушіння обмотки при підвищеній температурі, щоб видалити розчинник, прискорити затвердіння лаку та запекти лакову плівку. Для цього просочені обмотки завантажуються в піч для сушіння.

При невеликій кількості просочувальних виробів та малих їх габаритах застосовують просочувальну ванну, схема конструкції якої показана на рис.1.5.



- 1 - бічний отвір; 2 - вивідні кінці; 3 - осердя з обмоткою; 4 – лак; 5 – кришка; 6 - пневматичний циліндр з системою важелів; 7 - труба для підводу лаку;
8 - випускна труба

Рисунок 1.5 - Схема просочення зануренням

Завдяки простоті реалізації, відсутності потреби в спеціальному технологічному обладнанні і досить низької трудомісткості цей спосіб просочення отримав широке застосування.

Осердя з обмоткою 3 установлюють під нахилом у ванну з бічним відсмоктуванням 1. Потім закривають кришку 5 і через підвідну трубу 7, подають лак 4 до необхідного рівня. Відкривають і закривають кришку ванни пневмоциліндром 6 із системою важелів. Після закінчення режиму просочування лак видаляють із ванни через випускную трубу 8, а осердя з обмоткою тримають у ванні 15 - 30 хв для стікання з нього лаку. Після цього кришку відкривають і просочуванні осердя з обмоткою переносяться із ванни на стіл для замивання поверхонь, де присутність лаку є неприпустимою.

Після закінчення просочування дають стекти надлишкам лаку протягом 15 - 30 хв. Частини, що не підлягають просочуванню, протирають бавовняними серветками, змоченими в розчиннику. Цей процес повторюють після кожного просочування.

Метод просочування обмоток електричних машин у вакуумі під тиском є одним з найбільш сучасних методів ізоляції провідників. Спосіб просочення полягає в тому, що обмотувальний вузол поміщають в автоклав, створюють в ньому вакуум і, не знімаючи його, подають в автоклав лак [5], [6]. Коли рівень лаку стане вище обмотувального вузла, знімають вакуум і створюють тиск. Після тиску видаляють лак, знову створюють вакуум і тільки після цього витягають обмотувальний вузол з автоклава. На рис. 1.6 показано установка для просочування обмоток машин.

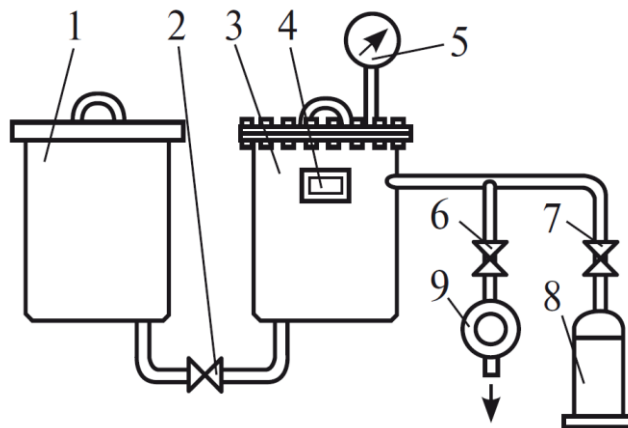


Рисунок 1.6 – Просочувальна установка компанії Meier Prozesstechnik

Відсутність повітря в обмотувальному вузлі, а також створення тиску після заповнення автоклаву лаком сприяють глибокому проникненню лаку в обмотку. Цей спосіб просочення дозволяє використовувати лак в'язкістю 55 – 100 Па·с. Наявність вакууму після просочення сприяє випаровуванню більше половини легких (летучих) речовин і підвищенню в'язкості лаку, при цьому він стає настільки в'язким, що не витікає з обмотки. Використання в'язкого лаку та підвищення його в'язкості відразу після просочення дозволяє за одне просочення ввести в обмотку необхідну кількість лаку, тому його проводять тільки один раз.

Цей спосіб просочення особливо ефективний для багатовиткових котушок.

Загальний принцип роботи установки (див. рис. 1.6), можна описати наступним чином [5].



1 - резервуар з рідким компаундом; 2, 6, 7 - крани; 3 - автоклав;
4 - оглядове вікно; 5 - вакуумметр; 8 - балон; 9 - вакуумний насос

Рисунок 1.7 – Установка для просочення у вакуумі та під тиском

Комплект котушок поміщають в автоклав 3 (рис. 1.7), який герметично закривається кришкою. Повітря відкачують з автоклава вакуумним насосом 9.

Після закінчення сушіння відкривають кран 2, і розплавлений компаунд із резервуару 1 під дією атмосферного тиску потрапляє в автоклав. Після цього вакуумний насос відключають, крани 2 і 6 закривають, а кран 7 відкривають і в автоклаві створюють тиск компресором (або балоном 8 із стисненим газом).

Компаунд під тиском швидше й глибше проникає між шарами ізоляції. Для підтримки малої в'язкості компаунду в процесі просочування його постійно підігрівають. Контроль процесу компаундування здійснюють вакуумметром 5 і через оглядове вікно 4.

Просочування струминним способом полягає у тому, що статор або якір (ротор) установлюють вертикально або похило до горизонталі, рис. 1.8, нагрівають його (підключивши обмотку до джерела змінного струму низької напруги) й поволі обертають, [1]. На верхню лобову частину обмотки з дозатора подається тонким струменем лак, який проникає через пази в нижню лобову частину. Подачу лаку припиняють після заповнення лаком нижньої лобової частини обмотки. При такому способі просочування використовують спеціальні швидковисихаючі лаки (компаунди). Обмотки, просочені сумішами без розчинників, мають невеликий час твердіння лаку й при нагріванні швидко висихають. Обмотка, яка має високу якість просочування, монолітна й добре зцементована.

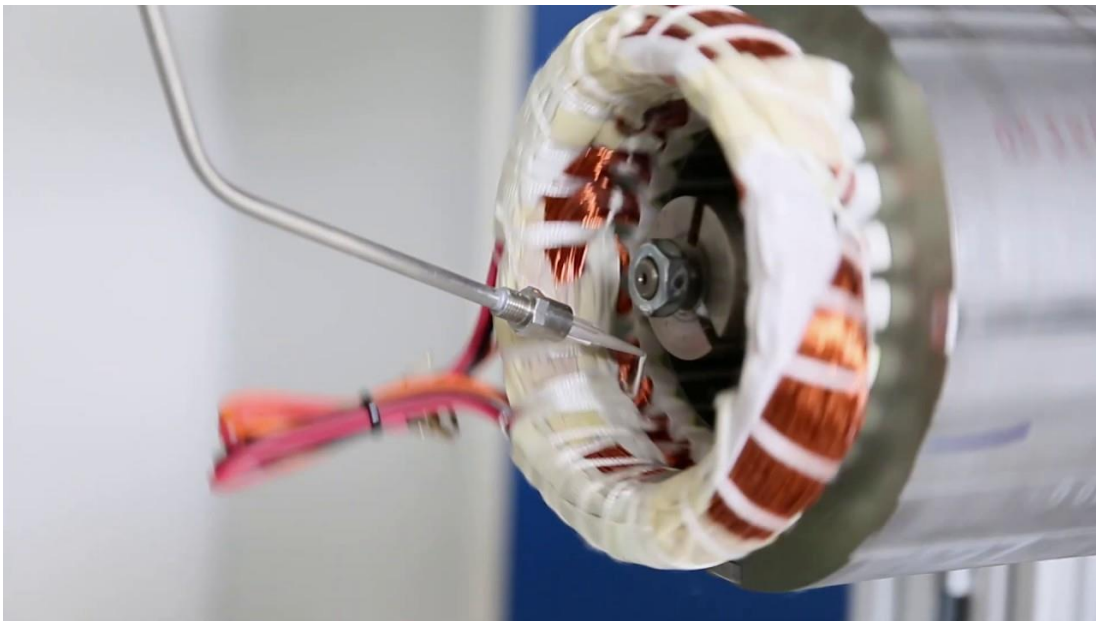
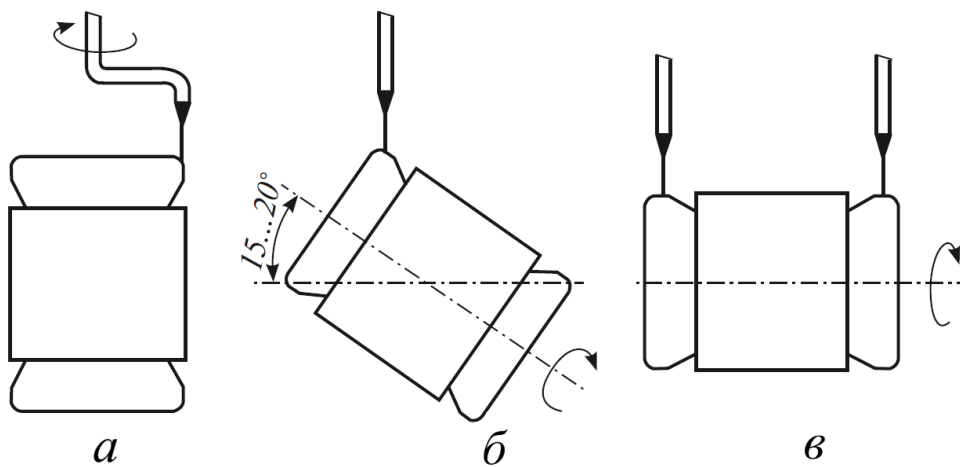


Рисунок 1.8 – Просочування обмотки краплинним методом

Просочувальний склад подається на лобову частину обмотки. Для найкращого проникнення обмотка нагрівається до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Лак проникає в пазову частину і протилежну лобову частину за рахунок гравітаційних і капілярних сил.

Існує три основних способи введення лаку в обмотку статора через лобову частину (рис. 1.9) залежно від положення статора:

1. Вертикальне. Лак подається на верхній лобову частину через сопло, що обертається. Просочувальна суміш рівномірно просочує верхню лобову частину, а потім через пази проникає в нижню лобову частину. Обмотка нагрівається як у процесі просочування, так і після його закінчення. Недоліком даного способу є нерівномірний розподіл просочувальної суміші: у верхній частині смоли менше, ніж у нижній.



a – вертикальне; *б* – похиле; *в* – горизонтальне

Рисунок 1.9 – Способи подачі струменя просочувальної суміші на обмотку статора АД

2. Похиле. Цей спосіб, являється найбільш популярним. Другий спосіб, являється найбільш популярним. Статор розташовується похило під кутом 15° - 20° , обертається зі швидкістю 20-25 об/хв. У нагріту обмотку через сопло тонким струменем подається просочувальний склад. Сопла нерухомі. Обмотка нагрівається до 60°C - 80°C шляхом пропускання змінного струму. Потрапляючи на обмотку, лак розріджується і легко проникає в паз.

3. При горизонтальному положенні обертового статора просочувальна суміш струменем подається з нерухомих сопел на обидві лобові частини й під дією капілярних сил проникає в пазову частину обмотки.

При капілярному методі просочення проводиться дозування просочувального матеріалу. При надлишку просочувального матеріалу відбувається забруднення обладнання та металевих частин. При малій подачі суміші обмотка просочується не повністю, що знижує термін її служби. Дозування проводиться двома способами: за часом закінчення просочувального матеріалу (при постійній в'язкості), за обсягом.

При дозуванні за часом просочувальна суміш подається в систему розподілу під постійним тиском, а швидкість її закінчення регулюється діаметром сопла.

При дозуванні за об'ємом кількість просочувальної суміші, що подається в обмотку, не залежить від її в'язкості. Дозування складу здійснюють, як правило, дозаторами плунжерного типу.

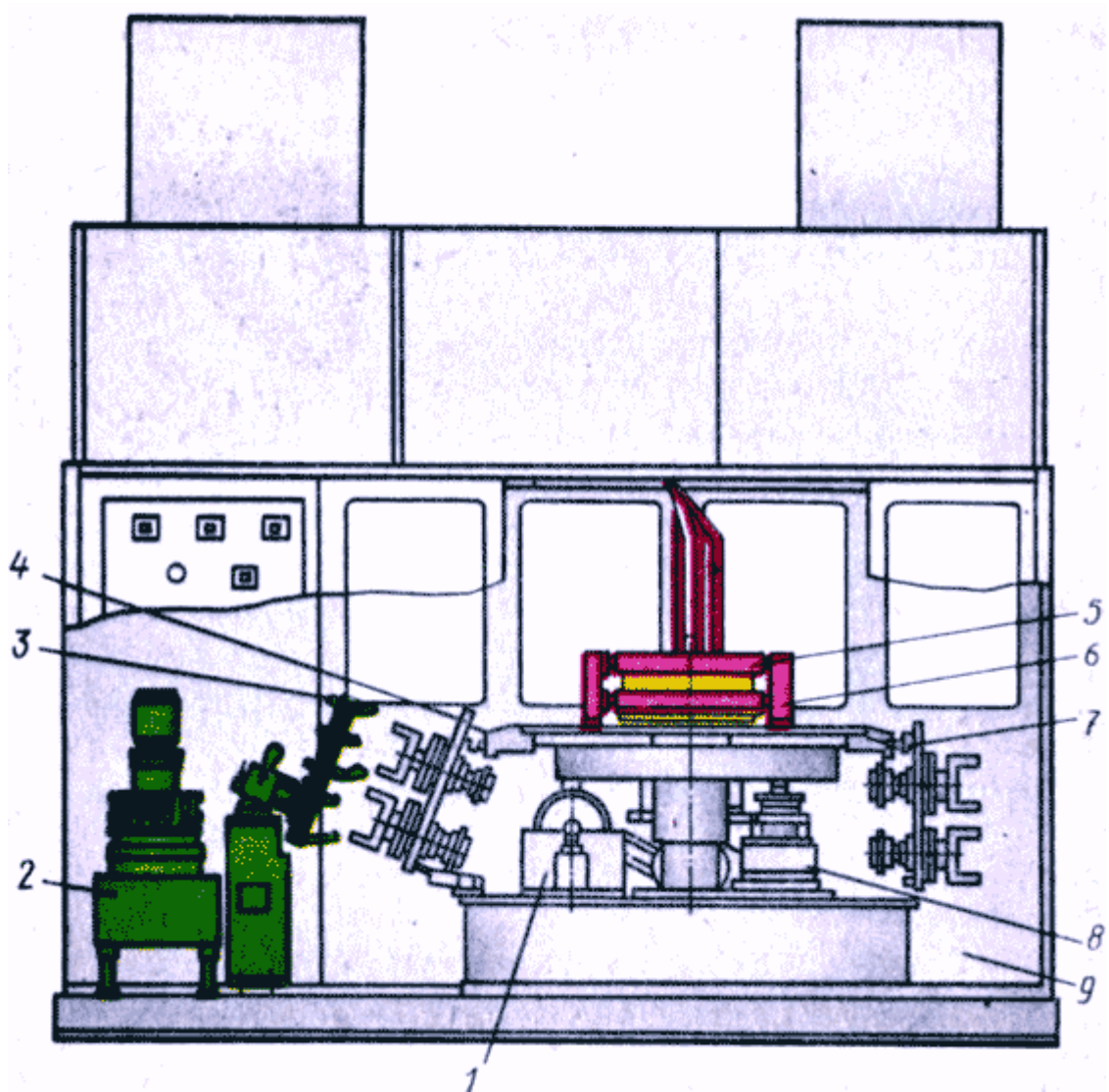
Нагрівання обмотки при просочуванні найчастіше здійснюють струмовим нагріванням, рідше використовують індукційне й терморадіаційне нагрівання.

Спосіб струминного просочування дозволяє широко впроваджувати механізацію й автоматизацію процесів просочування й термообробки обмотувальних вузлів. Для просочення виспних обмоток статорів АД розроблений ряд установок, що виконують просочення термореактивними составами без розчинників. Для просочення обмоток статорів АД основного виконання й модифікація із зовнішнім діаметром осердя 89 – 149 мм (крім багатошвидкісних та однофазних) створені установки трьох типорозмірів: УПС-3, УПС-4, УПС-6.

Для струминного просочення використовується установка УПС-4, рис. 1.10.

Установка УПС-4 для просочення статорів асинхронних двигунів (рис. 1.10) має стіл, котрий обертається 8 з вісімнадцятьма пристроями, потрібними для закріплення осердь статорів 4, пристрій для дозування 2 і подачі лаку 3, привод обертання столу 1 та привод обертання статорів 7, пристрій для струмового нагріву обмоток - колектор 5 і струмознімач 6. Всі механізми розміщені в корпусі 9 з оглядовими вікнами та патрубком, який підключається до вентиляційної мережі для відведення парів лаку. На кожне пристосування встановлюють по два осердя статора.

При завантаженні осердя статорів встановлюються на пристрої і вивідні кінці їх обмоток підключають до мережі змінного струму зниженої напруги. Стіл здійснює переривчастий обертальний рух під дією поворотного механізму 1, який включається через певні проміжки часу кроковим двигуном. Після чергового кроку кожен осердя статора, що знаходиться на пристрої, послідовно займає одне з вісімнадцяти положень - позицій. На 1-й та 2-й позиціях відбувається нагрівання обмотки струмом до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. На 3, 4 і 5 позиціях на поверхню лобових частин обмотки подаються через два сопла дози просочувального лаку.



1 – поворотний пристрій столу; 2 – пристрій дозування просочувальної суміші; 3 – пристрій розподілу просочувальної суміші; 4 – пристрій для закріплення статорів, що просочуються; 5 – колектор; 6 – струмознімач; 7 – стіл, що обертається; 8 – електропривод обертання статорів; 9 – каркас

Рисунок 1.10 – Схема установки для просочування типу УПС-4

Повний цикл просочення и термообробки відбувається при переміщенні осердь, що просочують, через всі 18 позицій. Такт робота установки регулюється в широких межах. На останній 18-й позиції знімаються просочені та встановлюються непросочені осердя. Прибирання та встановлення осердь (маса кожного не перевищує 10 кг) відбувається вручну. Установку обслуговує один оператор.

На 1-й и 2-й позиціях відбувається попереднє нагрівання обмоток до температури (80 – 100) °С. На 3–5-й позиціях на зовнішню й внутрішню поверхні верхньої лобової частини осердя, розташованого під кутом 20° до обрїю и обертового із частотою 25±5 об/хв., подаються через два сопла дози просочувального состава. На 6 – 15-й позиціях відбувається отвердіння просочувального суміші в обмотці. При цьому осердя перебувають у горизонтальному положенні та продовжують обертатися. На 16-й позиції припиняється живлення обмотки струмом, і на позицію завантаження та вивантаження осердя надходять трохи охолодженими.

У таблиці 1.1 наведено порівняння методів просочення, які були описані раніше. Наведено переваги та недоліки кожного з способу. **Кожному студенту необхідно самостійно заповнити таблицю 1.1 вказавши переваги і недоліки трьох способів просочування обмотки статора та зробити висновок який метод найбільш доцільний для заданого варіанту його двигуна.**

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика [4]

Назва методу	Переваги	Недоліки

2 РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ І ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СТРУМЕНЕВОГО ПРОСОЧУВАННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА

2.1 Вихідні дані до розрахунку

Параметри обмотки та осердя статора наведено у табл. 2.1. При розрахунку вважаємо, що просочування виконується в просочувальній установці УПС-4, з використанням компаунду КП-34.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

Номер варіанту	$\frac{d_{se}}{d_s}$,	l_s , мм	$\frac{d_{fhse}}{d_{fhs}}$,	l_{fs} , мм	$R_{s\theta a}$, Ом	$X_{\sigma s}$, Ом	$m_{Cu s}$, кг	$m_{Fe s}$, кг	Тип двигуна
	$\frac{\text{мм}}{\text{мм}}$		$\frac{\text{мм}}{\text{мм}}$						
1	$\frac{131}{74}$	78	$\frac{117}{80}$	45	4,11	3,3	1,59	4,21	80A2
2	$\frac{131}{74}$	98	$\frac{117}{80}$	45	2,59	2,2	1,82	5,28	80B2
3	$\frac{131}{84}$	78	$\frac{117}{90}$	40	7,15	4,64	1,36	3,38	80A4
4	$\frac{131}{84}$	98	$\frac{117}{90}$	40	5,3	3,6	1,49	4,24	80B4
5	$\frac{116}{65}$	65	$\frac{102}{70}$	42	12,1	5,2	0,91	2,7	71A2
6	$\frac{116}{65}$	74	$\frac{102}{70}$	42	8,35	3,46	0,96	3,0	71B2
7	$\frac{116}{70}$	65	$\frac{102}{75}$	40	12,4	8,2	0,92	2,34	71A4
8	$\frac{116}{70}$	74	$\frac{102}{75}$	40	9,41	9,41	0,94	2,68	71B4

Кінець таблиці 2.1

Номер варіанту	$\frac{d_{se}}{d_s}$,	l_s , мм	$\frac{d_{fhse}}{d_{fhs}}$,	l_{fs} , мм	$R_{s\theta a}$, Ом	$X_{\sigma s}$, Ом	$m_{Cu s}$, кг	$m_{Fe s}$, кг	Тип двигуна
	$\frac{\text{мм}}{\text{мм}}$		$\frac{\text{мм}}{\text{мм}}$						
9	$\frac{170}{90}$	105	$\frac{142}{95}$	59	1,125	2,8	4,3	9,79	100S2
10	$\frac{149}{104,3}$	140	$\frac{143}{108}$	40	3,56	6,8	1,87	6,7	90B6

Тлумачення позначень: d_{se} – зовнішній діаметр статора; d_s – діаметр розточування статора; l_s – довжина осердя статора; d_{fhse} – зовнішній діаметр лобових частин обмотки статора; d_{fhs} – внутрішній діаметр лобових частин обмотки статора; l_{fs} – довжина вильоту лобової частини; $R_{s\theta a}$ – активний опір фази обмотки статора; $X_{\sigma s}$ – індуктивний опір фази обмотки статора; $m_{Cu s}$ – маса міді обмотки статора; $m_{Fe s}$ – маса сталі осердя статора.

2.2 Розрахунок струмового нагріву при реалізації його на автоматизованій просочувальній установці

При розрахунку режимів струмового нагріву для термообробки просочених обмоток використані загальні рекомендації та методичні розрахунки, наведені у [1].

Перш за все, в відповідності з технічними даними просочувальної установки, що планується використовувати, визначається кількість тактів кожного режиму усього процесу: n_{prh} – кількість тактів попереднього підігріву; n_{imp} – кількість тактів просочування; $n_{h/t}$ – кількість тактів термообробки; $n_{c/d}$ – кількість тактів охолодження, відключення, знімання та установки осердя статора з обмоткою.

Кількість тактів по окремій операції наступні: $n_{prh} = 3$, $n_{imp} = 3$, $n_{h/t} = 9$,
 $n_{c/d} = 3$.

Час такту визначається по основній регламентованій операції – операції термообробки просочувального складу

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{t/pn}}{n_{h/t}}, \quad (2.1)$$

де τ_{total} – тривалість повної полімеризації просочувального складу.

Для просочувального компаунду КП-34 тривалість повної полімеризації $\tau_{t/pn}$ лежить у межах від 2160 с до 2400 с. Для зручності наступних розрахунків можна прийняти $\tau_{t/pn} = 2160$ с.

Підставляємо отримані значення до (2.1)

$$\Delta\tau = \frac{2160}{9} = 240 \text{ с.}$$

Тривалість кожної операції

$$\tau_i = \Delta\tau \cdot n_i, \quad (2.2)$$

де n_i – кількість тактів розрахованої операції.

Розраховуємо тривалість кожної операції згідно (2.2), відповідно тривалість попереднього підігріву:

$$\tau_{prh} = 240 \cdot 3 = 720 \text{ с.}$$

Тривалість просочування:

$$\tau_{imp} = 240 \cdot 3 = 720 \text{ с.}$$

Тривалість термообробки: $\tau_{h/t} = 240 \cdot 9 = 2160$ с.

Тривалість охолодження, відключення, знімання і установка статора:

$$\tau_{c/d} = 240 \cdot 3 = 720 \text{ с.}$$

Загальна тривалість струмового нагріву:

$$\tau_{ech} = \Delta\tau \cdot (n_{prh} + n_{imp} + n_{h/t}) = 240 \cdot (3 + 3 + 9) = 3600 \text{ с.}$$

Потужність попереднього підігріву осердя статора з обмоткою

$$P_{prh} = \frac{\Delta\theta_{prh}}{1 - e^{-\frac{\tau}{T}}} (\alpha_{Cu} S_{Cu} + \alpha_{Fe} S_{Fe}), \quad (2.3)$$

де $\Delta\theta_{prh}$ – перевищення температури попереднього підігріву, °С.

τ – тривалість нагріву, с;

T – постійна часу нагріву, с;

α_{Cu} , α_{Fe} – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні міді обмотки та сталі осердя відповідно, за [1] дорівнюють $\alpha_{Cu} = 14$ Вт/(°С·м²), $\alpha_{Fe} = 17$ Вт/(°С·м²);

S_{Cu} , S_{Fe} – площа охолодження поверхні міді обмотки та сталі осердя відповідно, м².

Перевищення температури попереднього підігріву визначаємо як

$$\Delta\theta_{prh} = \theta_{prh} - \theta_a, \quad (2.4)$$

де θ_{prh} – температура попереднього підігріву, для просочувального компаунду КП-34 знаходиться у межах від 90 °С до 199 °С, приймаємо $\theta_{prh} = 95$ °С;

θ_a – температура навколишньої середовища (повітря), приймаємо $\theta_a = 20$ °С.

Підставляємо отримані значення у (2.4)

$$\Delta\theta_{prh} = 95 - 20 = 75 \text{ °С.}$$

Постійна часу нагріву розраховується за формулою:

$$T = \frac{m_{Cu} c_{pCu} + m_{Fe} c_{pFe}}{\alpha_{Cu} S_{Cu} + \alpha_{Fe} S_{Fe}}, \quad (2.5)$$

де c_{pCu} – питома теплоємність міді, $c_{pCu} = 390$ Дж/(кг·°С) [1];

c_{pFe} – питома теплоємність сталі, $c_{pFe} = 480$ Дж/(кг·°С) [1].

Площа поверхні охолодження міді обмотки статора розраховуємо за формулою:

$$S_M = 2\pi(d_{fhse} + d_{fhs}) \cdot l_{fs} \cdot 10^{-6} + 2\pi(d_{fhse}^2 - d_{fhs}^2) \cdot 10^{-6}.$$

Площа поверхні охолодження сталі осердя статора розраховуємо за формулою:

$$S_{ст} = 2\pi(d_{se} + d_s) \cdot l_s \cdot 10^{-6}.$$

Розрахунок кривої нагріву рекомендується виконувати по точкам відповідним тактам роботи установки. Причому перші 6-8 точок необхідно визначати для кожного такту, а інші – дозволяється через такт.

При будь якого варіанті розрахунку обов'язково повинні бути визначені точки третього та п'ятнадцятого тактів.

Розрахунок виконується за формулою:

$$\Delta\theta_{prh} = \frac{P_{prh}}{\alpha_{Cu}S_{Cu} + \alpha_{Fe}S_{Fe}} \left(1 - e^{-\frac{\tau \cdot n_k}{T}} \right), \quad (2.6)$$

де n_k – порядковий номер такту.

Розрахунок першої точки наводити обов'язково у вигляді формули, розрахунок усіх інших точок наводити не треба, але результати розрахунку занести до табл. 2.2. Тобто ці розраховані значення необхідні для побудови кривої нагріву.

Таблиця 2.2 – Значення кривої нагріву

Номер такту n_k	Перевищення температури $\Delta\theta_{prh}$, °C	Номер такту n_k	Перевищення температура $\Delta\theta_{prh}$, °C
1		7	
2		8	
3		9	
4		11	
5		13	
6		15	

Згідно отриманих даних будується графік кривої нагріву, рис. 2.2. При побудові осі абсцис, вона розбивається на рівні проміжки часу по кількості робочих

тактів установки (для установки УПС-4 на 15 інтервалів). Ординати кривої відкладаються до рівня $\Delta\theta_{prh}$.

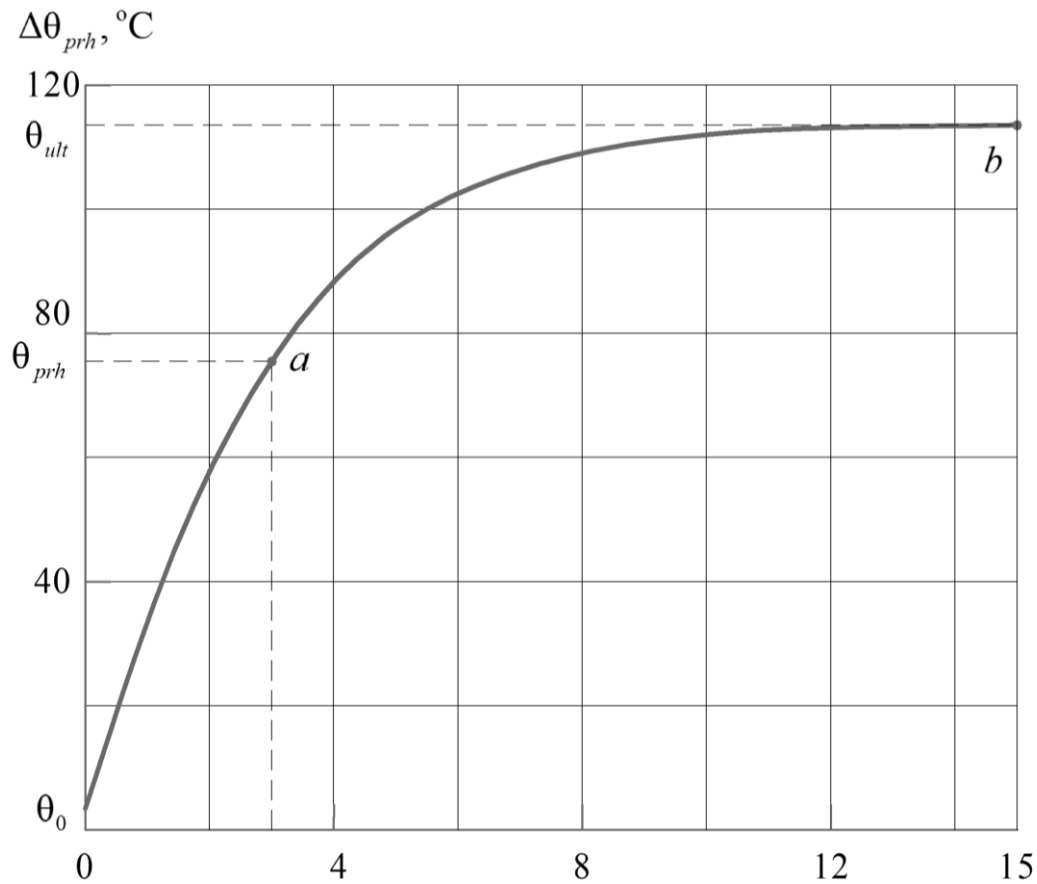


Рисунок 2.1 – Залежність $\Delta\theta_{prh}(n_k)$ (крива нагріву)

Згідно розрахованої потужності та відомим параметром обмотки статора визначається фазний струм I_s та відповідна напруга живлення струмового нагріву U_s :

$$I_s = \sqrt{\frac{P_{prh}}{4,2 \cdot R_{s\theta a}}},$$

$$U_s = I_s \sqrt{R_{s\theta a}^2 + X_{\sigma s}^2}.$$

По кривій нагріву оцінюється положення контрольних точок a та b . В точці a температура повинна знаходитися в інтервалі $90^\circ\text{C} < \Delta\theta_{prh} < 100^\circ\text{C}$, в точці b $160^\circ\text{C} < \Delta\theta_{prh} < 170^\circ\text{C}$.

Згідно з графіку умова **не виконується**, тому слід зробити корекцію напруги джерела струмового нагріву

Перерахунок напруги виконується за формулою:

$$U_{snew} = U_s \sqrt{\frac{\theta_{oft}}{\theta_k}}, \quad (2.7)$$

де U_{snew} – нове значення фазної напруги, при якому ми досягнемо оптимальної температури;

θ_{oft} – оптимальна кінцева температура, для складу КП-34, $\theta_{oft} = 165^\circ\text{C}$.

Нове значення фазного струму розраховуємо за формулою:

$$I_{snew} = \frac{U_{snew}}{\sqrt{R_{s\theta a}^2 + X_{\sigma s}^2}}.$$

Рнаходимо нове значення потужності підігріву, Вт:

$$P_{prh.new} = I_{snew}^2 \cdot 4,2 \cdot R_{s\theta a}.$$

Повторюємо розрахунок кривої нагріву згідно формули (2.6), для нового значення потужності підігріву.

Розраховані значення для побудови кривої нагріву занести до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Значення кривої нагріву

Номер такту n_k	Перевищення температура $\Delta\theta_{prh}$, $^\circ\text{C}$	Номер такту n_k	Перевищення температура $\Delta\theta_{prh}$, $^\circ\text{C}$
1		7	
2		8	
3		9	
4		11	
5		13	
6		15	

Згідно отриманих даних будується новий графік кривої нагріву, який показано на рис. 2.3.

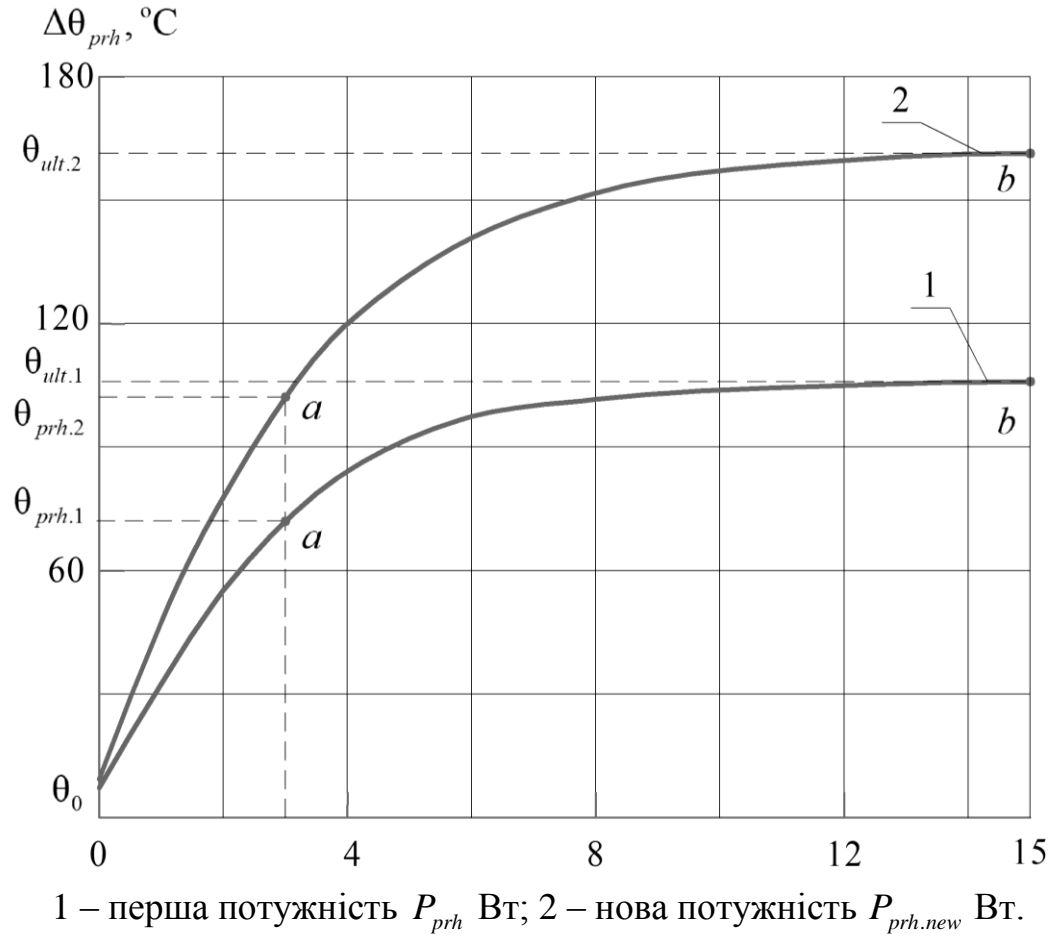


Рисунок 2.2 – Залежність $\Delta\theta_{prh}(n_k)$ (перерахована крива нагріву)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Юхимчук В.Д. Технологія виробництва електричних машин: підручник / В. Д. Юхимчук. – Х.: Тім Пабліш Груп, 2014.
- 2 Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020.
- 3 Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навчальний посібник. – Львів: «Магнолія-2006», 2015.
- 4 4 TYPES OF MOTOR WINDING INSULATION METHODS: Article of educational content // http://cemtm.iust.ac.ir/en/4_types_of_motor_winding_insulation_methods/, 04.04.2023.
- 5 Vacuum Pressure Impregnation (VPI) for electric motors / Alfanar Technical Services (ATS) // <https://blog.alfanartechnicalservices.com/?p=263>, 04.04.2023.
- 6 Vacuum Pressure Impregnation (VPI) or VPI Process / HECO Company, USA // https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/1792768/july%202020/Helpful_Articles/vacuum-pressure-impregnation-and-process.pdf, 05.04.2023.