

## Визначення та обґрунтування особливостей зміни властивостей конструктивних елементів машин постійного струму у процесі тривалої експлуатації

В статті визначено особливості зміни властивостей основних конструктивних елементів та вузлів машини постійного струму під час тривалої експлуатації. Розглянуто вплив елементів, які змінюють свої характеристики в часі на надійність та працездатність МПС. Окреслено шляхи вирішення проблеми визначення стану конструктивних елементів машин постійного струму, які мають високий час наробітку на відмову.

**електрична машина постійного струму, зміна властивостей, надійність, діагностика**

На багатьох потужних виконавчих механізмах встановлено машини постійного струму (МПС). Це зумовлено високою керованістю, навантажувальною здатністю МПС та можливістю керування без високовартісної системи перетворювачів. Їхня потужність знаходиться у двох діапазонах: десятки ват та десятки мегават [1]. Вони працюють як у помірних так і в тяжких умовах з агресивними середовищами у виробничих приміщеннях. У ході роботи двигунів постійного струму впродовж тривалого часу та внаслідок проведення їхнього планового та капітального ремонту змінюються властивості конструктивних вузлів та елементів. Це викликає погіршення робочих характеристик та умов охолодження, а отже зменшення імовірності безвідмовної роботи [4]. Достатня складність конструкції МПС обумовлює широкий спектр можливих дефектів та пошкоджень, які виникають внаслідок тривалої експлуатації [5]:

© І.А. Куш, А.С. Гарбузенко, 2012

- замикання, зношування колекторних пластин, зміна форми колектора;
- нерівномірне зношування, зміщення осі підшипникового вузла;
- порушення цілісності ізоляції обмоток якоря;
- пробій ізоляції обмоток збудження та компенсаційних обмоток;
- локальні закорочування сердечника статора;
- закорочування листів ЕТС пакету якоря.

Погіршення окремих складових частин МПС призводить до зниження експлуатаційного ресурсу та погіршення робочих характеристик машини постійного струму.

Обумовлення особливостей зміни стану окремих конструктивних елементів та вузлів й обґрунтування їх впливу на показники надійності, нагріву, робочі і пускові характеристики МПС для розробки шляхів визначення впливу зміни параметрів машини постійного струму.

Аналіз регламенту випробувань показує, що у більшості випадків при планово-попереджувальних та капітальних ремонтах машин проводиться діагностика відповідно до діючих правил експлуатації електрообладнання:

- проводиться оцінювання стану ізоляції та випробування ізоляції обмоток і бандажів;
- вимірюється опір обмоток на постійному струмові;

- визначаються характеристики неробочого ходу та випробовується міжвиткова ізоляція;
- проводиться вимірювання повітряного проміжку між полюсами та якорем (у машин потужністю понад 3 кВт);
- здійснюється перевірка машини на працездатність та визначення меж регулювання.

У процесі дослідження цього питання було виявлено, що дана програма випробувань не дозволяє оцінити реальний стан конструктивних частин та елементів, і відповідно передбачити час напрацювання на відмову машини. Тому визначання характеру впливу кожного із конструктивних елементів на якість роботи та тривалість служби МПС є важливим завданням.

На першому етапі вирішення даного завдання необхідно визначити ступінь впливу зміни властивостей кожного з конструктивних елементів окремо на робочі характеристики і надійність машини. Зміна властивостей таких основних елементів впливає на стан МПС: колекторно-щітковий вузол; підшипниковий вузол, обмотки збудження та якоря, сердечники статора та якоря.

Колекторно-щітковий вузол є однією з основних причин виходу з ладу МПС. На нього припадає близько 25% всіх відмов машин постійного струму [3]. Ознаками погіршення стану даного елемента є: зміна циліндричності колектора, порушення поліровки поверхні, поява нагару, забруднення, оплавлення поверхні та пробій ізолюючих пластин.

Існує три групи факторів, що викликають зміни стану колектору на відміну від початкового: електромагнітні процеси, механічні впливи та фізико-хімічна природа ковзаючого контакту. Електромагнітні факторами являються струмові перевантаження, електромагнітне навантаження та напруга між суміжними пластинами. До механічних факторів відносяться ослаблення пресування листів ЕТС, ексцентриситет, поява еліптичності колектору, вібрація та обертання якоря. Фізико-хімічний вплив проявляється в зношуванні щіток та колектора, запиленістю та вологістю поверхні колектора, кислотністю навколишнього середовища. На практиці переважає електроіскрове зношування

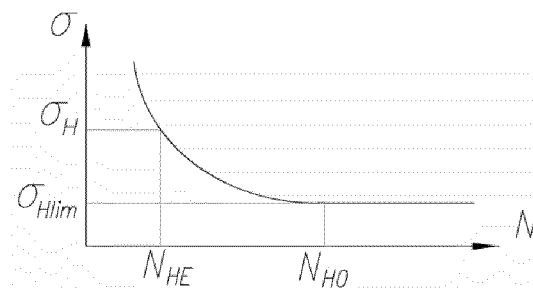
$$\alpha = 8.73 \cdot 10^{-2} \frac{n}{L_{щ} \cdot L_p} \tau_D^2, \quad (1)$$

- де  $\alpha$  – швидкість зносу колектора;
- $L_{щ}$  – довжина збігаючого краю щіток;
- $\tau_D$  – тривалість горіння іскрових розрядів;
- $L_p$  – індуктивність контуру, що розривається;
- $n$  – швидкість обертання колектора.

Наявність пошкоджень колектора, або зміни його експлуатаційних параметрів є наслідком впливу не тільки факторів старіння та зношування колектора і щіток, а й зміни стану інших конструктивних вузлів машини. Наприклад, погіршення стану підшипникового вузла призводить до появи ексцентриситету, або ослаблення колектору відбувається внаслідок підвищення вібрації т.д. Поява незначних несправностей колектору також має вплив на комутаційні процеси, а отже і на робочі характеристики машини. Оскільки є очевидним, що при зміні стану колектору зменшується площа контактної зони між колектором та щітками, то в обернено-пропорційній залежності збільшується і щільність струму. Зростання щільності струму призводить до зниження максимального навантажувального моменту та нагріву колектора.

Приблизно 30% відмов машин постійного струму відбувається внаслідок відмов підшипникових вузлів [3]. Крім того, нормальна робота підшипників є визначальним фактором для рівномірного розподілу повітряного проміжку. Оскільки параметри магнітної системи знаходяться у прямій залежності від величини та рівності повітряного проміжку по внутрішньому радіусу статора, то і стан підшипників має безпосередній вплив на параметри магнітної системи МПС.

Ознаками зміни властивостей підшипників є: стан бігової доріжки, сепаратору, шум, тугий хід та нагрів підшипникового вузла. Підґрунтям погіршення властивостей та руйнування структури підшипників можуть бути: структурні особливості металу, хімічна комбінація металу та змазки, корозія, тепловий вплив, механічні навантаження на поверхню та тіло кочення, проходження електричного струму і явище втомленості металу, яка характеризується кривою Велера, представленою на рис. 1. Найбільше впливає на зміну стану підшипника контактна втомленість робочих поверхонь, що проявляється у вищербуванні металу у вигляді мілкозернистих частинок. Вищерблені частинки разом із зовнішніми забруднювачами продовжують руйнувати структуру підшипника в зонах дотику робочих поверхонь та абразиву.



$N$  – число циклів навантажень до руйнування зразка;  $N_{HO}$  – число циклів навантажень, що відповідає початку ділянки;  $\sigma$  – механічна напруга;  $\sigma_{Hlim}$  – максимальна напруга, котру підшипник може витримати майже необмежену кількість циклів;  $\sigma_H$  – заданий рівень напруги;  $N_{HE}$  – еквівалентне число циклів навантажень

Рисунок 1 – Крива втомленості металу (крива Велера)

Внаслідок неправильно проведеного ремонту чи нерівномірного зношування підшипників виникають перекоси МРС, що викликають появу струмів в підшипниках. Замикання на корпус обмотки збудження та наявність заземлення призводить до протікання досить значних струмів у підшипниках, що веде до їхньої руйнації шляхом нагріву та електрокорозії.

Практика показує, що підшипникові вузли є особливо інтенсивним джерелом вібрації всього спектру частот. Амплітуда вібрації збільшується після ремонту, в аварійних і особливо важких режимах роботи. Відбувається підвищення амплітуди вібрації разом з появою ексцентриситету валу, нерівномірністю розподілу МРС, яке може бути викликаним несправністю колекторно-щіткового апарату через зростання реактивної ЕРС. Високочастотна складова спектру віброшвикувості та віброприскорення разом з електромагнітними та аеродинамічними зусиллями викликають значно прискорене зношування ізоляції машини.

Статистика відмов свідчить, що на загальне число відмов МПС через вихід з ладу обмотки якоря припадає 27% відмов, а через пробій обмотки збудження 18%. Ці дані свідчать про важливість врахування стану ізоляції при аналізі поточних параметрів машини та тривалості подальшої експлуатації.

Зміна властивостей ізолюючої поверхні обмоток відбувається у результаті нагрівання, механічного впливу, впливу агресивного середовища та ін. Основною складовою у процесі старіння ізоляції є температурний вплив. Вплив всіх факторів

старіння ізоляції врахувати неможливо, але основні з них відповідають відомим залежностям. Так, теплова складова визначається «правилом восьми градусів»[3]:

$$\tau = T_0 \cdot 2^{-\Theta/\Delta\Theta}, \quad (2)$$

де  $\tau$  – строк служби ізоляції при температурі  $\Theta$ ;

$T_0$  – умовний строк служби ізоляції;

$\Theta$  – температура ізоляції;

$\Delta\Theta$  – перевищення температури.

Положення даного правила доводять, що перевищення температури  $\Delta\Theta$  на кожні вісім градусів скорочує строк служби ізоляції вдвічі. Інші класи ізоляції, які витримують вищі температури, відповідно можуть витримувати більші перевищення  $\Delta\Theta$ , які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – залежність  $\Delta\Theta$  від класу ізоляції

Клас ізоляції	A	E	B	F	H	C
$\Theta_{\text{гранич}}$	105	120	130	155	180	> 180
$\Delta\Theta$	8	9.14	9.9	11.8	13.7	–

Тривалість експлуатації скорочується також від впливу напруженості електричного поля.

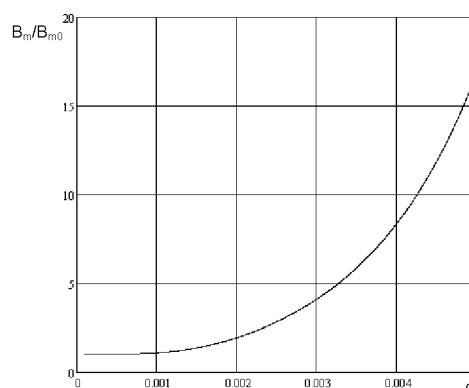
$$\lg \tau = \lg A_e - m \lg E, \quad (3)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля;

$A_e, m$  – коефіцієнти, які залежать від властивостей ізоляційного матеріалу.

Джерелом додаткових втрат у вигляді тепла та вібрації є сердечник статора з послабленим пресуванням та закороченими листами електротехнічної сталі. Додавання двох впливів може призвести до пробою ніж за умови теплового старіння.

Пакети статора та якоря через можливість виділення додаткових втрат та безпосередньому впливові на обмотки є важливими чинниками зниження надійності МПС. Погіршення властивостей сердечника МПС залежить не стільки від зміни властивостей ЕТС з часом, як від руйнування міжлистової ізоляції, що призводить до закорочування суміжних листів та до зниження магнітної індукції в закорочених контурах рис. 2. Даний рисунок показує, що дія вихрових струмів, які пропорційні квадрату магнітної індукції недостатньо компенсується при закорочуванні декількох листів ЕТС.



$B_m$  – значення магнітної індукції по товщині листа;  $B_{m0}$  – значення індукції в середині листа ЕТС;

$d$  – товщина закороченої ділянки пакету сердечника

Рисунок 2 – Зростання магнітної індукції в залежності від товщини закороченого контуру

У переважній більшості випадків діелектриком між пластинами статора та якоря є діоксид кремнію. Дана сполука руйнується від механічного впливу, тому правильне обслуговування та кваліфікований ремонт є пріоритетом в експлуатації машини.

МПС є складною електромеханічною системою, кожен елемент якої впливає як на стан всієї машини так і на властивості інших конструктивних частин. Тому виникає необхідність встановлення залежностей між впливом зміни властивостей кожного елемента на параметри та час безвідмовної роботи МПС. Для цього потрібно створити системи діагностики стану МПС, що передбачає наступні кроки:

- створення адекватної математичної моделі МПС, яка враховуватиме вплив зміни властивостей конструктивних елементів на параметри машини;
- розробка методики діагностики стану електричної машини, яка тривалий час експлуатувалася чи пройшла ремонт.
- розробка структури та підбір елементної бази випробувального комплексу, який би давав необхідні вихідні дані для аналізу стану досліджуваної машини.
- створення алгоритму програми аналізу отриманих даних для визначення дійсних параметрів та характеристик машин з високим ступенем напрацювання на відмову.

У роботі розглянуто причини погіршення стану та виходу з ладу основних конструктивних елементів та вузлів машини постійного струму. Описано механізм зміни параметрів основних конструктивних елементів. Визначено подальші кроки у забезпеченні визначення впливу зміни властивостей конструктивних елементів на параметри МПС.

## Список літератури

1. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. проектирование электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. Гольдберга О.Д. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с.
2. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384с.
3. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие для вузов / Кузнецов Н.Л. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.
4. Харяджан А.А. Послеремонтная диагностика и паспортизация машин постоянного тока с учетом изменения состояния пакета стали якоря: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.01 «Электрические машины и аппараты». – Кременчуг, 2004. – 28с.
5. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергия, 1969. – 397с.

*И. Куц, А. Гарбузенко*

### **Определение и обоснование изменения свойств основных конструктивных элементов МПТ в процессе длительной эксплуатации**

В статье определены особенности изменения свойств основных конструктивных элементов и узлов машины постоянного тока при длительной эксплуатации. Рассмотрено влияние элементов которые изменяют свои характеристики во времени на надежность и работоспособность МПТ. Намечены пути решения проблемы определения состояния конструктивных элементов машин постоянного тока, которые имеют высокое время наработки на отказ.

*I. Kushch, A. Garbuzenko*

### **Definition and justification of change properties of the basic structural elements of the DC motor in long term use**

The article describes the features and properties of the basic causes of change of structural components and assemblies DC machine for long term use. Influence of the elements that change characteristics over time in reliability and performance of DC machines is proved. Found ways to solve the problem of determine the state of structural elements of DC machines which long time have been are in use.

Одержано 15.09.12