

УДК 621.313.333

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМУМА ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА  
ОТРЕМОНТИРОВАННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Прус В.В., к.т.н., доц., Загурняк М.В., д.т.н., проф., Колотило И.А., ассистент  
Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского  
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20  
E-mail: prus@polytech.poltava.ua*

Для оцінювання припустимих з умови нагріву експлуатаційних параметрів АД розроблено методику теплового розрахунку температури обмотки статора з урахуванням нерівномірності розподілу властивостей сталі осердя статора.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, температура обмотка статора, тепловий розрахунок, перепроєктування.

To estimation conditions of the AM operational parameters allowable under heating the technique of thermal calculation of temperature of cores winding is developed taking into account of non-uniformity of distribution properties of a steel of the core.

**Key words:** asynchronous motor, cores winding temperature, thermal calculation, re-designing.

**Введение.** Надежность современного асинхронного электропривода, эксплуатируемого в промышленных условиях, преимущественно определяется надежностью асинхронного двигателя (АД), что объясняется частыми отказами последнего. Как правило, причиной отказа являются плохая технология производства и нарушение условий эксплуатации, а также повышенный износ отдельных частей электрической машины (ЭМ) при скачкообразном изменении характеристик и параметров под воздействием внешних перегрузок (скачкообразное изменение нагрузки) или характеристик питающей сети (снижение или рост напряжения питания, его несинусоидальность, изменение частоты и пр.). В большинстве случаев (85-90%) отказ АД происходит в результате повреждения обмотки статора, что требует для двигателей полной перемотки или, как принято считать, капитального ремонта.

После ремонта ЭМ наработка на отказ чаще всего существенно уменьшается, что напрямую связано с изменениями, происходящими в ее основных конструктивных частях: магнитопроводе и обмотке [1].

Причиной этих изменений является несовершенство самой технологии ремонта. Так, в ходе капитального ремонта при извлечении обмотки ее подвергают термической обработке вместе с сердечником статора, отжигая в печи с целью разрушения и размягчения изоляции, после чего обмотку обрубают и протаскивают волоком. Как свидетельствуют результаты проведенных исследований, при термической обработке сердечника частично или полностью разрушается изоляция между листами стали. Часть листов оказывается закороченной при выполнении последующих механических операций, изменяются и характеристики самой стали при нагревании из-за условий отжига, не регламентированного по времени и температуре в печи. В результате ухудшаются электрические и магнитные свойства

сердечника статора ЭМ, что приводит к неравномерности распределения магнитной проницаемости по его объему и локальному росту потерь на вихревые токи. В итоге ухудшаются условия теплопередачи от обмотки статора к стали сердечника, что повышает неравномерность нагрева обмотки и приводит к ее более быстрому выходу из строя вследствие теплового пробоя.

Избежать преждевременного отказа по этой причине неоднократно ремонтируемых АД можно, прогнозируя в ходе ремонта новые паспортные данные и показатели эксплуатационной надежности. При этом одной из главных задач является точное определение тепловых режимов работы АД.

**Анализ предыдущих исследований.** Анализируя результаты исследований по послеремонтному изменению параметров и характеристик АД, можно прийти к выводу, что изменение свойств стали сердечника приводит к росту тока  $I_0$  и потерь  $P_0$  холостого хода, ухудшению энергетических показателей, в частности, к снижению мощности  $P_2$  на валу, коэффициента полезного действия  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos \phi$ . Кроме этого, как свидетельствуют результаты экспериментов [1], в отремонтированных АД существенно растут греющие потери в статоре – потери в меди  $P_{m1}$  и потери в стали  $P_{c1}$ . Последнее обуславливает необходимость определения максимального превышения температуры обмотки статора с целью корректировки значений номинального тока  $I_{н}$ , а также мощности на валу  $P_{2н}$  из условий допустимого нагрева:

Значение превышения температуры обмотки статора можно определить экспериментально или с использованием расчетных методик.

Для экспериментального определения температуры обмотки используется контактный способ ее

контроля одночасно в декількох точках, а це значить, що первичні термоіндикатори (ТИ) повинні бути безпосередньо встроєні в обмотку і образувати невелику мережу.

Для вимірювання температури найбільш нагрітих точок встрайовані ТИ встановлюють на лобові частини обмоток, пазові частини обмоток (під клин), між листами активної сталі і в інші доступні частини ЕМ, а найбільш раціональним вибором первинного перетворювача температури є терморезистор, ввиду його малих габаритних розмірів і температурного коефіцієнта опору, який становить 2,5-6% на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Однак у розглянутому випадку, з урахуванням невизначеності місця локалізації точки з максимальним перевищенням температури обмотки, такий підхід непридатний.

В основі розрахункових методик лежать математичні моделі, частіше за все побудовані на основі методу теплових схем (ТС) [2], який використовує теплові опору, з'єднані в мережу, імітуючі реальні шляхи передачі теплових потоків в АД.

Особливістю застосування цього методу є те, що при розрахунках приймається, що тепловий потік передається від місця виділення греючих втрат в пазовій і лобовій частинах обмотки, а також в сталі статора в охолоджуючій середі з температурою  $\vartheta_{\text{oc}}$  по шляху найменшого опору. Однак, замість досягнення охолоджуючої середі, він змушений подолати електричну ізоляцію провідників і катушок, яка має властивості, близькі до теплоізоляції і частіше за все є багатошаровою. Крім цього, по шляху теплового потоку в охолоджуючій середі він проходить через сталь сердечника, подолає повітряні проміжки і пр., замінив які на теплові опору шляхом методу ТС можна отримати потрібну мережу опору. Однак для того, щоб виразити будь-який теплопровідний елемент або вузол в конструкції АД в вигляді теплового опору, необхідні величини його коефіцієнта теплопередачі (КТО) і коефіцієнта теплопровідності (КТП). Складність урахування можливого їх змінювання складає в тому, що КТП речовини, з якої виконаний елемент конструкції АД, зазвичай визначається емпіричним шляхом за табличними даними, а КТО є досвідчим коефіцієнтом і залежить від площі поверхні  $S$  і перевищення її температури над температурою охолоджуючої середі  $\vartheta_{\text{oc}}$ .

Крім цього, подібні моделі дають не повну картину температурного поля, а тільки середні значення температури лобової і пазової частин обмотки статора в установившійся режимі, не дозволяючи враховувати нерівномірність розподілу температури по довжині обмотки. Основними джерелами похибок в даному випадку є значення КТП і греючих втрат обмотки, які змінюються для відремонтованих АД внаслідок з-

мінювання властивостей сердечника статора по причині появи в ньому короткозамкнених листів і ослаблення пресовки [1].

Застосування при побудові теплових моделей іншого широко використовуваного методу – методу температурного поля – полягає в представленні частини обмотки в якості теплопровідного стержня, характеризується об'ємною щільністю втрат, площею, довжиною, периметром поперечного сечення, КТП в продольному напрямку і КТО з поверхні в охолоджуючу середу. Розподіл температури по довжині обмотки визначається в результаті розрахунку еквівалентної схеми заміщення, якою представляють кожний з ділянок обмотки. Такий підхід дає можливість провести детальний аналіз будь-якої ділянки обмотки для знаходження температурного максимуму, але розподіл КТП і втрат в сталі по довжині сердечника, так як і в попередньому методі, в ньому не враховується.

Таким чином, більшість з існуючих теплових моделей або взагалі не дозволяють виявити природну нерівномірність нагріву обмотки по довжині її пазових і лобових частин, або не дають можливості урахування виникаючої нерівномірності теплопередачі від обмотки до сталі, вираженої в зміні втрат в сталі і КТП сердечника.

**Ціль роботи** – розробка ефективного підходу і математичної моделі для розрахунку максимуму перевищення температури обмотки статора, враховуючи нерівномірність розподілу втрат в сталі сердечника статора і теплопередачі по його об'єму, що дає можливість визначити граничні експлуатаційні параметри, оцінити надійність АД і розробити комплекс заходів для урахування і компенсації виявлених змін властивостей сердечника статора.

**Матеріал і результати дослідження.** Збільшити точність розрахунку максимуму температури обмотки статора можна, використовуючи підхід, запропонований в [3]. Він базується на спільному використанні аналітичного методу і методу теплових схем, при розв'язанні яких визначаються граничні умови для розв'язання диференціальних рівнянь. Виходячи з різних умов теплопередачі пазової і лобової частин, обмотка розбивається на три основні ділянки: лобова частина обмотки з боку вентиляторної частини, пазова частина і лобова частина обмотки з боку вала. При цьому існує можливість розбиття пазової частини обмотки на нескінченне число ділянок, що характеризуються різними рівнями втрат в сталі, що слід з'ясувати в результаті локального тестування сердечників статорів [1].

В основу запропонованої методики покладено рівняння теплопровідності, отримане в [3]:

$$\begin{aligned}
 & -\lambda_M S_{M1} Z_1 \frac{d\theta_{л1}}{dx_{л1}} + P_{01} (\sigma + \beta \theta_{л1}) dx_{л1} = \\
 & = -\lambda_M S_{M1} Z_1 \frac{d}{dx_{л1}} (\theta_{л1} + \frac{d\theta_{л1}}{dx_{л1}} dx_{л1}) + \\
 & + (\theta_{л1} - \vartheta_{вх}) \frac{2\Lambda_{ло}}{l_{л1}} dx_{л1},
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda_M$  - коэффициент теплопроводности меди обмотки;  $S_{M1}$  - площадь сечения меди обмотки в пазу статора;  $P_{01}$  - потери на единицу длины обмотки

$$P_{01} = \frac{\sum P_{гр}}{l_{л1} + l_{л2}}; \quad (2)$$

$\sigma$  - температурный коэффициент учета расчетной температуры окружающей среды

$$\sigma = \frac{235 + \vartheta_{ос}}{235 + \vartheta_o}; \quad (3)$$

$\beta$  - температурный коэффициент приращения потерь

$$\beta = \frac{1}{235 + \vartheta_o}; \quad (4)$$

$\vartheta_o$  - температура опорного узла тепловой схемы

$$\vartheta_o = \frac{\vartheta_{вх} + \vartheta_{вых}}{2}, \quad (5)$$

где  $\vartheta_{вх}, \vartheta_{вых}$  - значения температуры воздушного потока на входе и на выходе машины соответственно;  $\Lambda_{ло}$  - тепловая проводимость от лобовой части обмотки к окружающему воздуху;  $\theta_{л1}$  - превышение температуры лобовой части обмотки;  $Z_1$  - число зубцов статора АД;  $l_{л1}, l_{л2}$  - соответственно длины лобовой и пазовой частей обмотки.

Аналогичное уравнение записывается и для пазовых частей обмотки. После преобразования исходных уравнений в соответствии с принятыми в [3] допущениями, можно получить:

- для лобовых частей обмотки со стороны вентилятора:

$$\frac{d^2 \theta_{л1}}{dx_{л1}^2} = m_{л1}^2 \theta_{л1} + n_{л1}; \quad (6)$$

- для лобовых частей обмотки со стороны привода:

$$\frac{d^2 \theta_{л2}}{dx_{л2}^2} = m_{л2}^2 \theta_{л2} + n_{л2}; \quad (7)$$

- для пазовых частей обмотки:

$$\frac{d^2 \theta_{пi}}{dx_{пi}^2} = m_{пi}^2 \theta_{пi} + n_{пi}, \quad (8)$$

где  $m_{л1}, m_{л2}, m_{пi}$  и  $n_{л1}, n_{л2}, n_{пi}$  - соответственно тепловой параметр, характеризующий условия охлаждения лобовой и участков пазовой частей обмотки и тепловая нагрузка:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{л1}^2 &= \frac{1}{\lambda_M S_1 Z_1} \left( \frac{2\Lambda_{ло}}{l_{л1}} - P_{01} \beta \right); \\
 n_{л1} &= -\frac{1}{\lambda_M S_1 Z_1} \left( \frac{2\Lambda_{ло} \vartheta_{вх}}{l_{л1}} - P_{01} \sigma \right); \\
 m_{л2}^2 &= \frac{1}{\lambda_M S_1 Z_1} \left( \frac{2\Lambda_{ло}}{l_{л2}} - P_{01} \beta \right); \\
 n_{л2} &= -\frac{1}{\lambda_M S_1 Z_1} \left( \frac{2\Lambda_{ло} \vartheta_{вх}}{l_{л2}} - P_{01} \sigma \right); \\
 m_{пi}^2 &= \frac{1}{\lambda_M S_1 Z_1} \left( \frac{\Lambda_{пci}}{l_{пi}} - P_{01} \beta \right); \\
 n_{пi} &= -\frac{1}{\lambda_M S_1 Z_1} \left( \frac{\Lambda_{пci} \theta_{ci}}{l_{пi}} - P_{01} \sigma \right).
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь  $\Lambda_{пci}$  - тепловая проводимость от участка пазовой части обмотки к стали;  $\theta_{ci}$  - превышение температуры участка стали.

При решении системы дифференциальных уравнений постоянные интегрирования для лобовой и пазовой частей обмотки находятся из условий непрерывности температуры обмотки по ее длине:

$$\left. \begin{aligned}
 \theta_{i-1} &= \theta_i; \\
 \frac{d\theta_{i-1}}{dx_{i-1}} &= \frac{d\theta_i}{dx_i},
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $i$  и  $i-1$  - номера участков, на которые разбита обмотка по длине.

В ходе расчета начало координат принимается со стороны вентилятора наружного обдува. Вначале с помощью метода тепловых схем [2] рассчитываются превышения температуры внутреннего воздуха со стороны привода и вентилятора, а также ряд тепловых проводимостей для каждого из участков обмотки, которые в ходе расчета можно считать постоянными.

Особенность нахождения максимума температуры в случае неравномерного распределения свойств сердечника заключается в том, что расчет для пазовой части обмотки необходимо проводить с учетом реального распределения потерь в стали и, соответственно, температур участков стали, необходимых для расчета тепловой нагрузки  $n_{пi}$ . Таким образом, пересчет значений по (6)-(8) а также коэффициентов в (9) с учетом (10) нужно делать на каждом из участков, для которого известны потери в стали, что приводит к отличной от [3] методике нахождения максимума температуры обмотки статора. В результате строится зависимость изменения превышения температуры по длине обмотки, из которой определяется местонахождение точки с максимальной температурой обмотки статора АД и значение температуры в этой точке.

Основной проблемой при расчете является невозможность непосредственного учета действительного изменения КТП по длине сердечника, а именно отсутствие информации о его зависимости от величины и вида дефектов, выделяемых в процессе ло-

кального тестирования [1].

Стандартные способы определения КТП в данном случае неприменимы по причине сложности геометрии магнитной системы сердечника статора и неравномерности распределения его свойств. Поэтому в ходе исследований была обоснована возможность получения уточненных значений КТП методом решения обратной тепловой задачи, заключающейся в следующем. В обмотку статора, в зоне искусственно создаваемых дефектов сердечника необходимых видов и размеров, вставляются термоиндикаторы, позволяющие измерить установившиеся значения превышения ее температуры, по которым, используя упрощенные методики теплового расчета, например из [2], восстанавливаются значения КТП. В итоге могут быть получены зависимости изменения КТП от вида дефекта и размеров поврежденной зоны, используемые в дальнейшем при расчетах максимального превышения температуры обмотки по (6)-(10).

С этой целью, в результате анализа средств и методов контроля температуры с учетом особенностей конструкции магнитной системы статора, коэффициента заполнения паза медью, диапазона температур, особенностей наводок от электромагнитного поля на первичный измерительный преобразователь, а также учитывая допустимый уровень погрешности измерений, были обоснованы требования относительно структуры и реализована система контроля температуры обмоток статора АД.

Модуль контроля температуры обмоток представляет собой компьютеризированную измерительную систему на базе 16 контактных датчиков на первичных цифровых малогабаритных преобразователях типа DS1820, соединенных параллельно по 1-wire интерфейсу и связанных с COM-портом компьютера при помощи микроконтроллера PIC16F877.

Структурная схема модуля контроля температуры представлена на рис. 1.

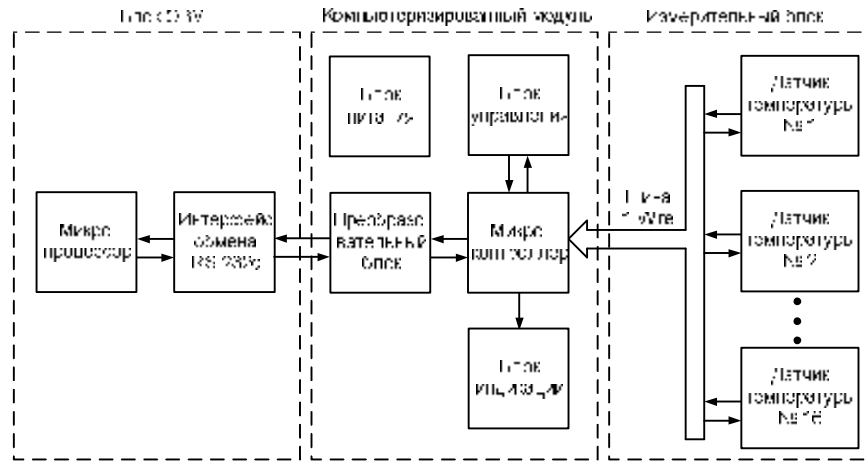


Рисунок 1 – Структурная схема модуля контроля температуры

Передача данных в системе осуществляется по интерфейсам 1-wire и RS232c. Время получения данных от датчиков температуры микроконтроллером (МК) зависит от количества датчиков и составляет 0,5 с на одно подключение, чего достаточно, учитывая постоянную времени нагрева обмотки. МК с помощью разработанного алгоритма получает данные в виде сетевого адреса, значение температуры и состояния управляющих регистров датчика, а также передает их в виде команд и сетевых адресов датчиков. Процесс приема-передачи данных организован по принципу ведущий-ведомый, где МК выступает в роли ведущего, а термодатчик или группа датчиков в роли ведомого. Далее МК обрабатывает полученную информацию и готовит ее для передачи на блок ЭВМ по интерфейсу RS232c. ЭВМ, используя разработанный для работы с модулем драйвер, получает и окончательно обрабатывает данные.

В результате на мониторе ЭВМ отображаются экспериментально измеренные значения превышения температуры обмотки статора в точках, в которые были заложены термодатчики. На основе этих значений ЭВМ рассчитывает и выводит на экран графики зависимости КТП от параметров дефектов

сердечника.

Модифицированный метод расчета апробирован на примере АД типа АИРС160S4, моделируемого в [3], что отражено на рис. 2. Процентное распределение потерь в стали и относительные изменения значения КТП при расчетах были взяты из допустимого диапазона в соответствии с данными по их реальному их распределению по длине статора, полученным в ходе локального тестирования и тепловых испытаний, а температуры участков стали рассчитаны по методу эквивалентных тепловых схем замещения для упрощенной тепловой схемы статора в соответствии с [2].

На рис. 2 кривая 1 соответствует нормальному состоянию сердечника статора, кривая 2 учитывает только локальное изменение потерь в стали, кривая 3 дополнительно к этому учитывает изменение КТП. Как видно из рис. 2, при прочих равных условиях даже учет реального распределения потерь в стали видоизменяет кривую превышения температуры обмотки и дает другие значения его максимума, а введение в методику изменения значений КТП, обусловленного наличием дефектов сердечника, существенно изменяет форму этой кривой и дает макси-

мальное превышение температуры обмотки, которое выше исходного на 7-10%. Получаемый эффект еще более значителен, если проводить подобные расчеты для паза статора, зубцы вокруг которого обладают наихудшими показателями по потерям в стали, что позволяет прогнозировать реальное превышение температуры обмотки статора в отремонтированных АД.

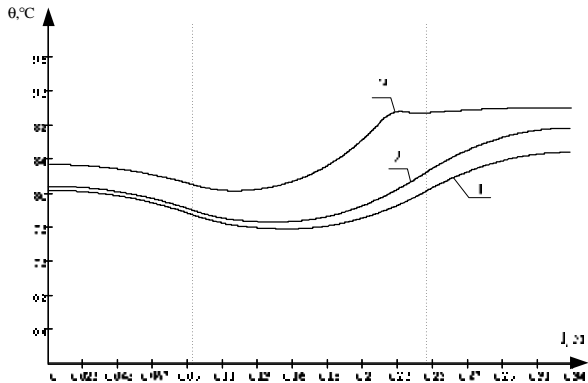


Рисунок 2 – Сравнительные зависимости изменения превышения температуры обмотки статора  $\theta$  по ее длине  $l_1$

Для подтверждения достоверности и адекватности предлагаемого подхода необходимо в дальнейшем провести ряд экспериментальных исследований по получению профилей изменения температуры обмотки статора в АД с определенным в процессе локального тестирования состоянием сердечника статора. С этой целью предполагается использовать разработанную систему контроля температуры, позволяющую контролировать температуру обмотки статора одновременно в 16-ти исследуемых точках и строить по ним температурные профили.

Допустимые из условия нагрева значения тока статора и мощности на валу АД определяются из соотношений:

$$I_{1\text{доп}} = I_{1н} \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}}}{\theta_{\text{max}}}}; \quad (11)$$

$$P_{2\text{доп}} = P_{2н} \frac{\theta_{\text{доп}}}{\theta_{\text{max}}}, \quad (12)$$

где  $\theta_{\text{доп}}$  - допустимое превышение температуры для установленного класса изоляции обмотки статора.

Величины, рассчитываемые из соотношений (11)-(12), характеризуют ток статора и мощность на валу, при которых отремонтированный АД не будет перегреваться. То есть для случая, когда  $\theta_{\text{max}} < \theta_{\text{доп}}$ , возможно повышение мощности до

величины  $P_{2\text{доп}}$  при изменении нагрузки или параметров напряжения питания.

Кроме этого, полученное значение максимума превышения температуры может использоваться в моделях эксплуатационной надежности для определения времени наработки АД до отказа [4], а сам предложенный метод – при перепроектировании АД, что позволит оценивать эффективность влияния изменения обмоточных данных на уровень греющих потерь статора.

#### Выводы.

1. В работе выполнена модификация метода расчета максимального превышения температуры обмотки статора, который заключается в учете при решении данной задачи факта неравномерности распределения потерь в стали и КТП сердечника статора.

2. Обоснован подход косвенного определения изменения КТП путем решения обратной тепловой задачи и разработано испытательное оборудование для этой цели.

3. Учет в модифицированной методике на этапе апробации закономерностей изменения свойств сердечника, полученных по данным локального тестирования, позволил получить максимум превышения температуры обмотки статора, превосходящий значение для неповрежденного сердечника на 7-10%, достоверность чего должна быть экспериментально подтверждена при дальнейших исследованиях.

4. Полученные результаты могут использоваться при оценке допустимых эксплуатационных параметров и показателей надежности отремонтированных АД, а также в ходе перепроектирования их обмоточных данных, направленного на снижение греющих потерь в статоре.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прус В.В. Діагностика електротехнічної сталі статорів та паспортизація асинхронних двигунів в процесі ремонту: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Національна академія наук України, Інститут електродинаміки. – К., 2003. – 19 с.
2. Сипайлов Е.А., Санников Д.И., Жадан В.М. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 171 с.
3. Тубис Я.Б., Фанарь М.С., Елин Д.Г. Расчёт распределения температуры обмоток асинхронных двигателей // Электротехника. – 1989. – №3. – С. 12-14.
4. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.