

## ТЕПЛОВИЙ МЕТОД У СИСТЕМІ ДІАГНОСТИКИ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

*В. В. Кривоносов, аспірант*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [kryvvnosov@nubip.edu.ua](mailto:kryvvnosov@nubip.edu.ua)*

**Анотація.** Асинхронні двигуни (АД) є найбільш поширеними електроспоживачами у портових та суднових електротехнічних комплексах. Частка АД серед усіх електроприймачів, що працюють при напрузі до 1000 В, становить до 70 % від загальної кількості. Основним чинником скорочення терміну служби електричних машин, які експлуатуються в умовах підвищеної запиленості навколишнього середовища, є прискорене старіння ізоляції статорних обмоток. Товщина шару пилу на верхній частині лобової обмотки двигунів потужністю 50 кВт і більше становить від 2 до 5 см. Накопичення пилу на поверхні ізоляції обмоток АД призводить до зниження тепловіддачі та локального підвищення температури ізоляції під шаром пилу. Розроблення способу діагностики причин теплового навантаження ізоляції статорних обмоток і системи температурного захисту АД, визначення умов настання моменту проведення профілактичних робіт, а також створення алгоритмів і програмного забезпечення для пристроїв теплового захисту асинхронних двигунів є актуальним завданням.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, температурний захист, локальний перегрів ізоляції, програмне забезпечення, тепловий захист електродвигуна

**Актуальність.** Асинхронні двигуни (АД), завдяки простоті конструкції та можливості застосування частотних перетворювачів, є найбільш поширеними електроспоживачами в електротехнічних комплексах. Найчастіше АД експлуатуються в мережах низької напруги; їхня частка становить до 70 % від загальної кількості електродвигунів, що використовуються в промисловості [1]. На промислових підприємствах, технологічні процеси яких пов'язані з переробкою та транспортуванням сипких матеріалів, основною причиною скорочення терміну служби асинхронних двигунів є теплові перевантаження ізоляції статорних обмоток. Причинами таких перевантажень можуть бути як загальні струмові перевантаження, так і локальні – спричинені запиленістю поверхні ізоляції провідним або непровідним пилом. Аналіз проблеми своєчасної діагностики причин теплового

перевантаження ізоляції статорних обмоток дає змогу своєчасно відключати АД від мережі живлення у разі струмових перевантажень і подавати сигнал при надмірному забрудненні поверхні ізоляції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Статистичні дослідження [2] показують, що причиною 80-85 % виходів з ладу АД, що працюють в умовах вугільно перевантажуючих терміналів портів, є втрата діелектричних властивостей ізоляції статорних обмоток АД. В умовах відмови ряду торгівельних портів України від планово-попереджувальних ремонтів і переходу до профілактики за фактом, своєчасне виявлення аномального режиму роботи АД потребує розробки нових методів та пристроїв діагностики, що є запорукою безаварійної роботи підприємств. Проведення спрямованого профілактичного ремонту скорочує чисельність обслуговуючого персоналу і грошово-матеріальні витрати.

Як відомо [3], термін служби ізоляції визначається виразом:

$$T_{\text{ізол}} = A \cdot e^{-y\Theta}, \quad (1)$$

де  $A$  і  $y$  – коефіцієнти, які залежать від класу ізоляції;  $\Theta$  – температура.

Для класу ізоляції  $A$  при температурі  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ізол}}$  – 16 років;

при температурі  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ізол}}$  – 4 роки;

при температурі  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ізол}}$  – кілька днів.

Перегрівання ізоляції статорних обмоток АД вище допустимого значення, навіть на  $8\text{-}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , призводить до зменшення терміну служби АД у два і більше рази. Тривала експлуатація АД в умовах підвищеної запиленості навколишнього середовища призводить до покриття верхньої лобової частини обмоток статора АД пилом. Для двигунів потужністю  $50\text{ кВт}$  і більше товщина шару пилу становить  $2\text{--}5\text{ см}$ , тоді як нижня частина лобових обмоток зазвичай залишається чистою. Пил на поверхні ізоляції обмоток спричиняє зниження тепловіддачі та локальне підвищення температури ізоляції, що прискорює її старіння.

Для виявлення перегрівання ізоляції статорних обмоток електричних машин застосовуються різні методи та пристрої теплового захисту. Один із таких методів передбачає використання комутаційних апаратів із вбудованими тепловими елементами [4]. Недоліком цього способу є неможливість контролю локального

підвищення температури окремих ділянок ізоляції, а також низька чутливість, через що спрацьовування відбувається лише при значному перегріванні. Це може бути спричинено як струмовими перевантаженнями, так і запиленням обмоток пилом, що призводить до скорочення строку служби ізоляції.

Відомі також способи температурного захисту електричних машин, реалізовані в пристроях [5–7]. У таких пристроях вимірюють температуру лобової частини обмоток статора АД за допомогою датчика температури, розміщеного безпосередньо на обмотці. При перевищенні допустимого значення температури відбувається автоматичне відключення двигуна від мережі живлення.

Недоліком цього технічного рішення є локальність вимірювання: температура ізоляції контролюється лише в одній точці, хоча перегрівання може бути нерівномірним. Таке явище можливе у випадках виткових замикань, неповнофазних режимів або локального запилення поверхні ізоляції. Будь-яке підвищення температури ізоляції викликає відключення двигуна, що не завжди є доцільним. Так, у разі запилення обмоток статора відключення від мережі не потрібне – достатньо сигналізувати про необхідність профілактики. Застосування описаних способів і пристроїв не дозволяє однозначно визначити причину перегрівання, уникнути помилкових відключень, а також запобігти розвитку процесу старіння ізоляції, спричиненого надмірним запиленням. Отже, своєчасне виявлення локальних перегрівань ізоляції статорних обмоток і визначення моменту проведення профілактичних робіт є важливим та актуальним завданням.

**Мета дослідження** - розроблення неруйнівного способу діагностики причин теплового навантаження ізоляції статорних обмоток та системи температурного захисту асинхронних двигунів (АД), визначення умов настання моменту проведення профілактичних робіт, розроблення алгоритмів і програмного забезпечення для пристроїв температурного захисту АД.

**Матеріали та методи дослідження..** Розрахункові та експериментальні дані показали, що різниця температур між чистою та запиленою ізоляцією залежить лінійно від товщини шару пилу та визначається його теплопровідністю [8].

Тривала експлуатація асинхронних двигунів (АД) в умовах підвищеної запиленості навколишнього середовища призводить до утворення шару пилу на верхній лобовій частині обмоток статора. Для двигунів потужністю 50 кВт і більше товщина шару пилу становить 2–5 см. Накопичення пилу на поверхні обмоток знижує тепловіддачу та викликає локальне підвищення температури ізоляції під шаром пилу.

Відповідно до рівняння теплового балансу АД:

$$dQ = \Delta P dt = c m d\Theta + k_{mo} s_n \Theta dt \quad (2)$$

де  $dQ$  – втрати теплової енергії, виділені в АД при протіканні робочого струму;  $c$  – питома теплопровідність АД;  $m$  – маса АД;  $s_n$  – площа охолодження АД;  $k_{mo}$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\Theta$  – перевищення температури АД над температурою навколишнього середовища.

Ослаблення теплового потоку  $q$  від ізоляції обмотки статора до повітря, вважаючи плоско паралельними стінки пилу:

$$q = -\alpha \frac{d\Theta}{dx} \quad (3)$$

де  $q$  – тепловий потік;  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності пилу;  $\Theta$  – температура зміни потоку уздовж осі  $x$ .

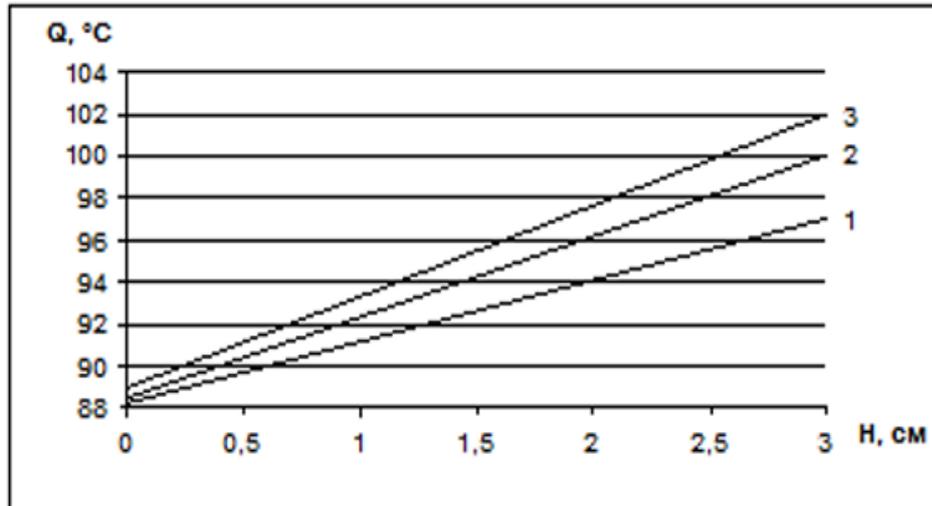
**Результати досліджень та їх обговорення.** Перетворимо рівняння (2) і (3), отримуємо залежність товщини покриття пилу  $H$  від різниці температур ізоляції покритої і не покритим пилом  $\Delta\Theta_{yc}$  в усталеному тепловому режимі АД:

$$H = \frac{\alpha \cdot \Delta\Theta_{yc}}{\frac{\Delta P}{s_n} - \Delta\Theta_{yc1} k_{mo}} \quad (4)$$

де  $\Delta\Theta_{yc} = \Delta\Theta_{yc2} - \Delta\Theta_{yc1}$ ;  $\Delta\Theta_{yc1}$  – температура ізоляції непокрита пилом;  $\Delta\Theta_{yc2}$  – температура ізоляції під пилом завтовшки  $H$ .

Вираз (4) показує, що перевищення температури ізоляції прямо пропорційне товщині пилу і її теплопровідності. Таким чином, порівнюючи температури ізоляції покритим пилом і не покритим пилом можливо судити про товщину шару пилу, на поверхні ізоляції. Результати проведених експериментальних досліджень залежності

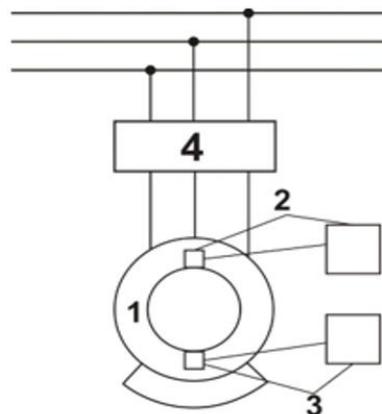
температури ізоляції обмоток АД від товщини пилового покриття і складу пилу наведені на рис. 1.



**Рис. 1. Залежності температури ізоляції обмоток АД від товщини пилового покриття і складу пилу, де крива 1 – вугільний пил, крива 2 – графітний пил, крива 3 – глиноземний пил**

Теоретичні та експериментальні дослідження дали змогу розробити новий спосіб температурного захисту асинхронних двигунів (АД) [9].

На рис. 2 подано схему розміщення температурних датчиків на поверхні статорних обмоток АД.



**Рис. 2. Схема розміщення температурних датчиків на поверхні статорних обмоток електродвигуна**

На рис. 2, позначено: 1 – асинхронний електродвигун, 2 і 3 – температурні датчики з АЦП і показчиками температури, 4 – комутаційний блок.

Для асинхронних двигунів, що працюють в умовах підвищеного запилення та струмових перевантажень, розроблено спосіб і пристрій діагностики та захисту електродвигуна від температурних і струмових перевантажень [8] (рис. 3).

Новизна розробленого пристрою полягає в тому, що діагностика струмових перевантажень і визначення товщини пилового покриття здійснюються за двома параметрами — значеннями температури та швидкістю їх зміни.

Для виконання умов діагностики температурного перевантаження ізоляції необхідно дотриматися таких умов:



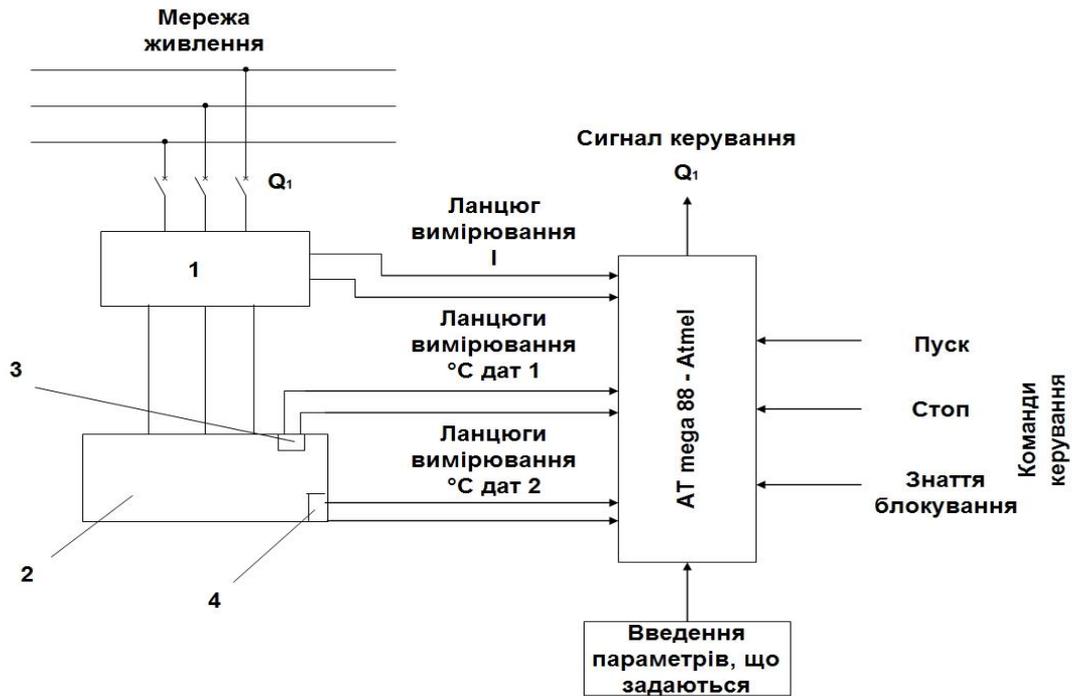
**Рис. 3. Блок-схема пристрою діагностики та захисту асинхронного електродвигуна від температурного та струмового перевантаження**

1. На поверхні лобової частини обмоток АД, схильних і несхильних до запилення, встановлюються температурні датчики 2 і 3 (рис. 2).

2. За значеннями температур датчиків виявляється струмове перевантаження, граничне локальне запилення ізоляції, визначається товщина пилового покриття обмотки.

Виявлення граничного запилення визначає момент проведення профілактичних заходів.

На рис. 4 приведена логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів вимірювання контрольованих величин та командних керуючих сигналів.



**Рис. 4. Логічна схема проходження інформаційних сигналів, сигналів вимірювання контрольованих величин та командних керуючих сигналів**

На рис. 4 позначено: 1 – блок трансформаторів струму; 2 – електроспоживач; 3 – перший давач вимірювання температури ізоляції; 4 – другий давач вимірювання температури ізоляції,  $Q_1$  – пускач (вимикач) для включення и відключення електроспоживача.

Для роботи мікроконтролера розроблено алгоритм та програма діагностики причин теплового навантаження і температурного захисту АД [11], яку представлено на рис. 5.

На рис. 5 позначено:  $t_{д1}$  – температура першого давача,  $t_{д2}$  – температура другого давача,  $t_{доп}$  – допустима температура нагрівання ізоляції,  $H$  – товщина шару пилу,  $H_{доп}$  – допустима товщина шару пилового покриття,  $I$  – сила струму навантаження.

Програма працює так.

Давачі температури встановлюють на запиленій та незапиленій ділянках поверхні ізоляції. Після подачі команди «Пуск» здійснюється перевірка наявності

команди «Блокування». За її відсутності відбувається підключення електроустаткування до живильної мережі.

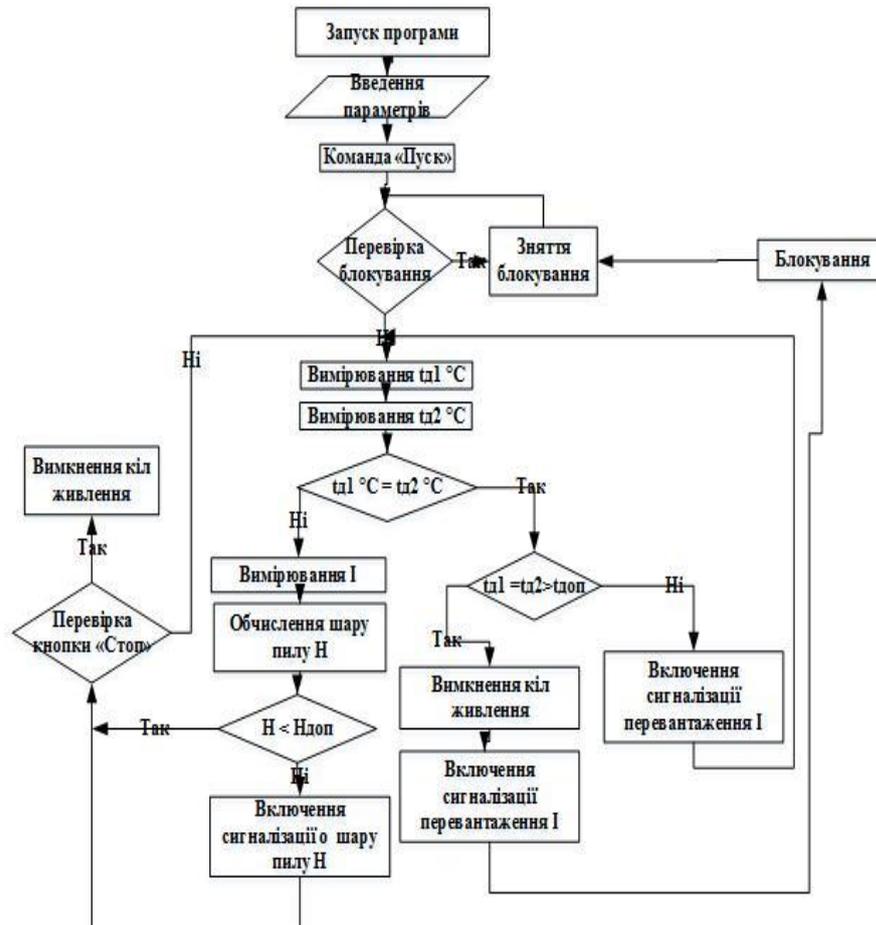


Рис. 5. Алгоритм роботи пристрою діагностики причин теплового навантаження і температурного захисту ЕО.

У процесі роботи обладнання постійно вимірюються температурні значення першого та другого давачів. За відсутності струмового перевантаження й запилення поверхні ізоляції показники обох давачів збігаються. Отримані дані надходять на вхід мікроконтролера, де обробляються, після чого на дисплеї відображаються температури обох давачів і струм навантаження.

Підвищення струмового навантаження, що може бути спричинене зміною режимів мережі або внутрішніми несправностями електроустаткування, призводить до одночасного зростання температури обох давачів.

Коли температура досягає допустимого значення, наприклад 95 °С, мікроконтролер формує сигнал, який надходить у блок керування та сигналізації — вмикається індикація струмового перевантаження. Під час подальшого зростання

температури до критичного рівня (наприклад, 105 °С) пускач Q1 автоматично відключає електроустаткування від мережі, подає команду «Блокування» та сигналізує про аварійне перевантаження. У процесі тривалої експлуатації відбувається нерівномірне запилення поверхні ізоляції. У цьому випадку показники давача, встановленого на запиленій ділянці, будуть вищими, ніж у другого давача. Отримана температурна інформація передається до мікроконтролера, де за виразом (3) обчислюється товщина пилового покриття. При перевищенні допустимого значення вмикається сигналізація про необхідність очищення або проведення профілактичних робіт.

```
Меню :  
0 - Ввод параметров.  
1 - Запуск работы.  
Выбор :
```

```
Меню изменения :  
0 - Изменение tдоп.  
1 - Изменение R.  
2 - Изменение A1.  
3 - Изменение Hдоп.  
4 - Назад.  
Выбор :  
0  
Ввод значения tдоп :  
105
```

```
Проверка Блокировки!  
Блокировка отключена. Продолжение работы.  
Измерение температуры td1: 106  
Измерение температуры td2: 106  
Отключение цепей питания.  
Включение сигнализации перегрузки I.  
Проверка Блокировки!  
Включена блокировка. Снять блокировку? (0-да 1-нет): 0  
Измерение температуры td1: 20  
Измерение температуры td2: 25  
Измерение тока I: 20  
Вычисление слоя пыли N: 0.001875 м.  
Проверка нажатия на кнопку СТОП!  
Кнопка СТОП нажата?(0-да, 1-нет): 0  
Отключение цепей питания.Для продолжения нажмите любую клавишу . . .
```

**Рис. 6. Протокол роботи комп'ютерної програми ""Діагноста причин температурного перевантаження і захист електроустаткування від перегрівання".**

Таким чином, діагностування причин температурного перевантаження електроустаткування дозволяє однозначно визначити джерело нагрівання та забезпечує своєчасний захист від перегрівання, що значно підвищує надійність і термін експлуатації обладнання.

На рис. 6 наведено протокол роботи комп'ютерної програми «Діагностика причин температурного перевантаження та захист електроустаткування від перегрівання».

### **Висновки та перспективи.**

1. Термін експлуатації АД, які працюють в умовах запиленого середовища, залежить від локального перегрівання ізоляції.
2. Покриття поверхні ізоляції шаром пилу, товщиною 3 і більше сантиметрів, скорочує термін експлуатації АД в 1,8 - 2.3 рази.
3. Критерієм визначення початкового моменту проведення профілактичних робіт є різниця температур ізоляції покритої і не покритої пилом, яка не перевищує 5 °С.
4. Одночасне досягнення температури ізоляції у двох місцях вимірювання вище допустимого значення є критерієм визначення пошкодження в АД, або у приводному механізмі, або мережі живлення, при цьому АД відключається від мережі.

### **References**

1. Ostashevskiy, M. O., & Yurieva, O. Yu. (2018). Electrical machines and transformers (V. I. Milykh, Ed.). Kyiv: Karavela Publishing House.
2. Montanari, G. C., Morshuis, P., Seri, P., & Ghosh, R. (2020). Ageing and reliability of electrical insulation: The risk of hybrid AC/DC grids. *High Voltage*, 5(3). Available at: <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0371>
3. Voldek, A. I. (1978). *Electrical machines: Textbook for technical university students*. Leningrad: Energiya.
4. Rules for Electrical Installations (PUE). (2009). (6th ed.). Kharkiv: Fort Publishing.
5. Patent of Ukraine No. 16922. (2006). Useful model. IPC H02H5/00. Bulletin No. 8.
6. Author's Certificate of the USSR No. 1584028. (1990). IPC H02H7/08, H02H7/085. Bulletin No. 29.
7. Patent of Ukraine No. 53896. (2003). Invention. IPC H02H5/04, H02H5/10. Bulletin No. 2.
8. Kryvonosov, V. Ye., & Vasylenko, S. V. (2015). Diagnostics and protection of winding insulation of induction motors operating in aggressive environments. *Bulletin of the Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, 31, 148–155.
9. Patent of Ukraine No. 107898. (2015). Method for control and thermal protection of electrical machine windings operating in dusty environments (Kryvonosov, V. Ye., Zhezhelenko, I. V., Moskovets, O. A., & Vasylenko, S. V.). Application No. a201401923.

Bulletin No. 4.

10. Kryvonosov, V. Ye. (2018). Diagnosis of causes of thermal overload and protection of electrical equipment from overheating [Computer program]. Certificate No. 77424.

11. Kryvonosov, V. Ye., Kryvonosov, V. V., & Boryakin, A. O. (2020). Monitoring of the condition of groups of induction motors and their protection from emergency modes [Computer program]. Certificate No. 98201.

## **THE THERMAL METHOD IN THE DIAGNOSTIC AND PROTECTION SYSTEM OF AN ELECTRIC MOTOR**

*V. Kryvonosov*

**Abstract.** *Induction motors (IMs) are the most widespread electrical consumers in port and ship electrical complexes. The share of IMs among all electrical receivers operating at voltages up to 1000 V reaches up to 70 % of the total number. The main factor that shortens the service life of electric machines operating under conditions of increased dustiness of the environment is the accelerated aging of stator winding insulation. The dust layer thickness on the upper part of the end winding of motors with a power of 50 kW or more ranges from 2 to 5 cm. The accumulation of dust on the surface of the IM winding insulation leads to reduced heat dissipation and local overheating of the insulation under the dust layer. The development of a method for diagnosing the causes of thermal loading of stator winding insulation and a system for thermal protection of IMs, determining the conditions for preventive maintenance, as well as creating algorithms and software for devices providing thermal protection of induction motors, is therefore a relevant task.*

**Key words:** *induction motor, thermal protection, local overheating of insulation, software, thermal protection of an electric motor*