

УДК 621.316.92

DOI: 10.31388/2078-0877-2020-20-4-126-135

ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Курашкін С. Ф., к.т.н.

ORCID ID 0000-0002-3361-9489

Попова І. О., к.т.н.,

ORCID ID 0000-0001-5429-8269

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: etem@tsatu.edu.ua

Постановка проблеми. До складу електромеханічної системи входить автоматизований електропривод, який здійснює необхідний характер руху технологічного агрегату. Найчастіше в якості електроприводу виступає асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором. Структура електромеханічної системи зазнає постійних змін, через що підвищуються вимоги щодо оцінки поточного технічного стану і експлуатаційної надійності електродвигунів. Раннє запобігання аварійним ситуаціям унаслідок прихованих дефектів або непрогнозованого експлуатаційного впливу можливе за умови безперервного діагностування поточного технічного стану силового електрообладнання. Разом з цим поліпшуються техніко-економічні показники функціонування електромеханічних систем в цілому.

Сучасні засоби безперервного технічного діагностування і захисту силового електрообладнання передбачають застосування методів, заснованих на використанні математичних моделей. Моделювання в значній мірі близько описує фізичні процеси, що відбуваються в ньому.

У даний час більш ніж 70% всього парку асинхронних електродвигунів складають машини, що були в капітальному ремонті хоча б один раз, а більше 60% виробило свій ресурс. Щорічно виходять з ладу і ремонтуються до 30% електричних машин [1, 2]. В 85-95% випадків вихід електродвигунів з ладу пов'язаний в першу чергу з пошкодженням ізоляції обмоток [3]. Таким чином, строк служби асинхронного електродвигуна визначається, в основному, якістю ізоляції обмоток.

Отже, проблема контролю експлуатаційних режимів роботи силового електрообладнання та його поточного технічного стану є актуальною та ініціює розробку нових технічних засобів діагностування і захисту. Їх застосування дозволить підвищити ресурс

роботи електроустаткування з врахуванням індивідуальних особливостей динаміки старіння ізоляційних властивостей матеріалів, які застосовуються в його конструкції.

Аналіз останніх досліджень. Електромеханічні системи, як правило, мають багатодвигунний електропривод, в той час як більша кількість існуючих пристроїв захисту асинхронних двигунів від аномальних режимів передбачає індивідуальний захист. Застосування подібних пристроїв для захисту групи електродвигунів підвищують капіталовкладення на організацію технічного діагностування.

Фактори, що приводять до пошкодження ізоляції обмотки статора електродвигуна різні, але більшість з них супроводжується попереднім підвищеним нагрівом і прискореною витратою ресурсу ізоляції [4]. Найбільш частіше перегрів обмоток електродвигуна виникає при загальмованому роторі (проблеми з механічною частиною), обриві фази живлення статора, відхиленні напруги мережі живлення від нормованих значень або її несиметрії [5]. Також можливий сукупний вплив означених випадків, наприклад, навіть незначне перевантаження за струмом під час живлення несиметричною напругою може значно скоротити ресурс ізоляційної конструкції електрообладнання.

При застосуванні індивідуальних пристроїв захисту не враховується залежність його параметрів від несиметрії напруги, завантаження робочої машини, особливості її механічної характеристики тощо. У результаті пристрій захисту відключає електродвигун під час виконання технологічного процесу, що веде до збільшення експлуатаційних витрат. Треба виходити з критерію оцінювання режиму роботи за припустимою витратою ресурсу ізоляції обмотки електродвигуна [3] – це дасть можливість передчасно попередити обслуговуючий персонал про аномальний режим роботи і прогнозувати час роботи обладнання.

Формулювання цілей статті. Розробка пристрою захисту багатодвигунного електроприводу з урахуванням впливу перевищення температури статорних обмоток. Критерієм діагностування, за яким визначається спроможність електродвигунами виконувати свою роботу, є припустимі витрати ресурсу ізоляції.

Основна частина. Розробку сучасних пристроїв діагностування та захисту електрообладнання проводять із використанням новітньої елементної бази, що дозволяє значно спростити схемотехніку порівняно із застосуванням класичних рішень. Одним з таких перспективних напівпровідникових елементів є негатрон – електронний напівпровідниковий пристрій, який в певному режимі

роботи має від'ємне значення основного диференційного параметру (від'ємний активний опір, ємність або індуктивність) [6].

Технологія виробництва поверхових напівпровідникових негатронів достатньо трудомістка, тому доцільно застосування їх аналогів, наприклад, на біполярних транзисторах (рис. 1). Схема має малі втрати енергії, високу температурну стабільність, значну і стабільну амплітуду вихідного сигналу. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) негатрону (рис. 2) має ділянку з позитивним (AB) і негативним (BC) диференціальним опором. При зростанні прикладеної напруги до пікового значення U_B , струм досягає максимального значення I_{max} , а потім зменшується до повного закриття при напрузі U_C .

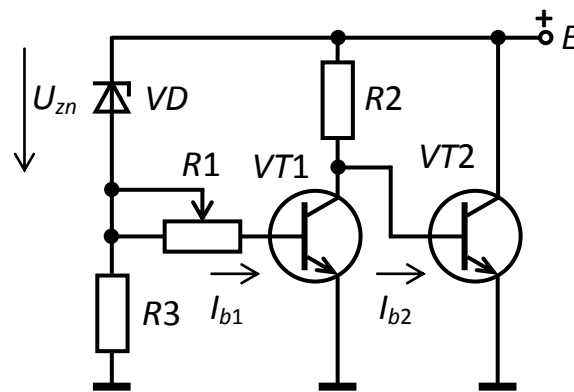


Рис. 1. Принципова електрична схема негатрону

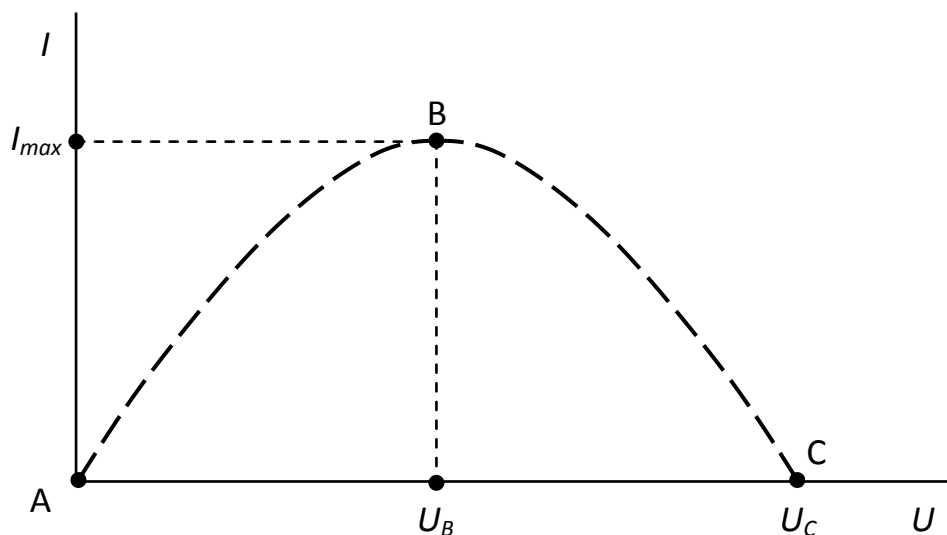


Рис. 2. ВАХ негатрону

Експериментально було визначено, що співвідношення між опороми $R1$, $R2$ аналогу негатрону

$$k = \frac{R1}{R2} \quad (1)$$

визначає можливість зміни ширини ВАХ. Так, збільшення опору резистора $R1$ відносно $R2$ приводить до зміщення ВАХ вправо по осі напруги, напруги відсічки U_C збільшується (рис. 3).

Отримані ВАХ аналогу негatrona дозволяють зробити висновок про спроможність змінювати їх в широких межах. Аналог можна застосовувати в якості перетворювача температури, якщо в якості резистора $R1$ застосувати терморезистор з позитивним температурним коефіцієнтом (позистор) – його опір під час зростання температури збільшується.

Застосування позисторів на відміну від термісторів дає меншу похибку, оскільки їх температурний коефіцієнт опору $\alpha = 15-50 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, в той час як у термісторів $\alpha = 4-8 \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Це дає можливість контролю одночасно декількох об'єктів.

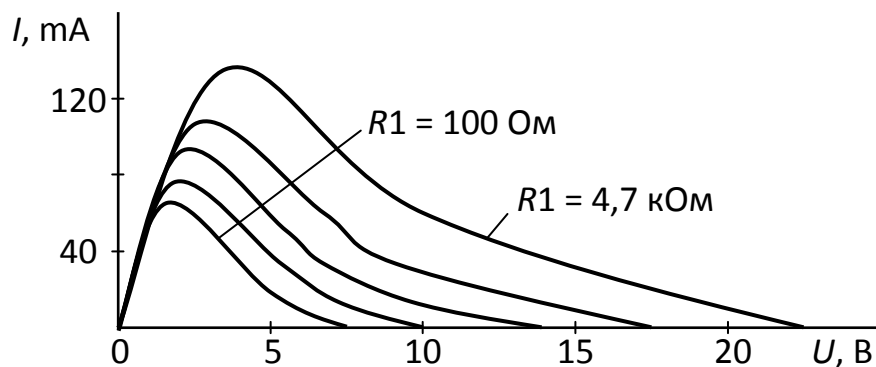


Рис. 3. Штучні ВАХ негatronу при $R2 = 1 \text{ кОм}$

До пристрою захисту асинхронних електродвигунів з огляду на сформульовані вище цілі висуваються наступні вимоги:

- контроль напруги зворотної послідовності мережі живлення електроприводу;
- контроль перевищення температури обмоток електродвигунів;
- попередження світловою і звуковою сигналізацією про підвищену витрату ресурсу ізоляції;
- відключення електромеханічної системи при досягненні перевищення температури обмотки електродвигуна припустимого значення.

Згідно з цими вимогами складена структурна схема пристрою захисту (рис. 4). Пристрій передбачає захист групи з трьох електродвигунів, але їх кількість може масштабуватися.

Робота пристрою відбувається згідно алгоритму програми, код якої знаходиться в пам'яті мікроконтролера МК. Вхідні сигнали нього поступають від фільтру напруги зворотної послідовності ФЗНП і з перетворювачів температури ПТ1-ПТ3 виконаних на негатронах через фільтр Ф. Результат обчислювання швидкості зносу ізоляції і припустимого часу роботи з мікроконтролера подається до блоку сигналізації БС.

Принципова електрична схема пристрою захисту асинхронних електродвигунів наведена на рис. 5.

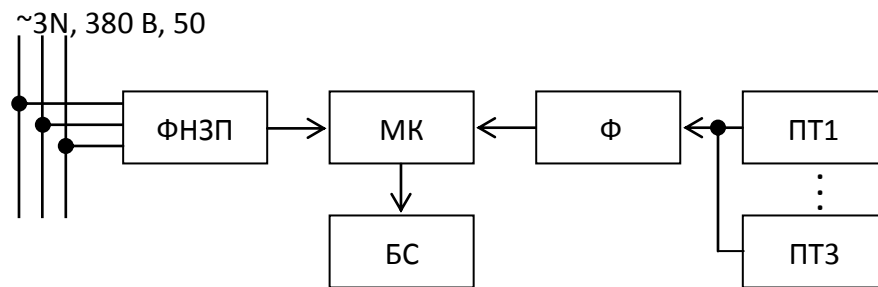


Рис. 4. Структурна схема пристрою захисту

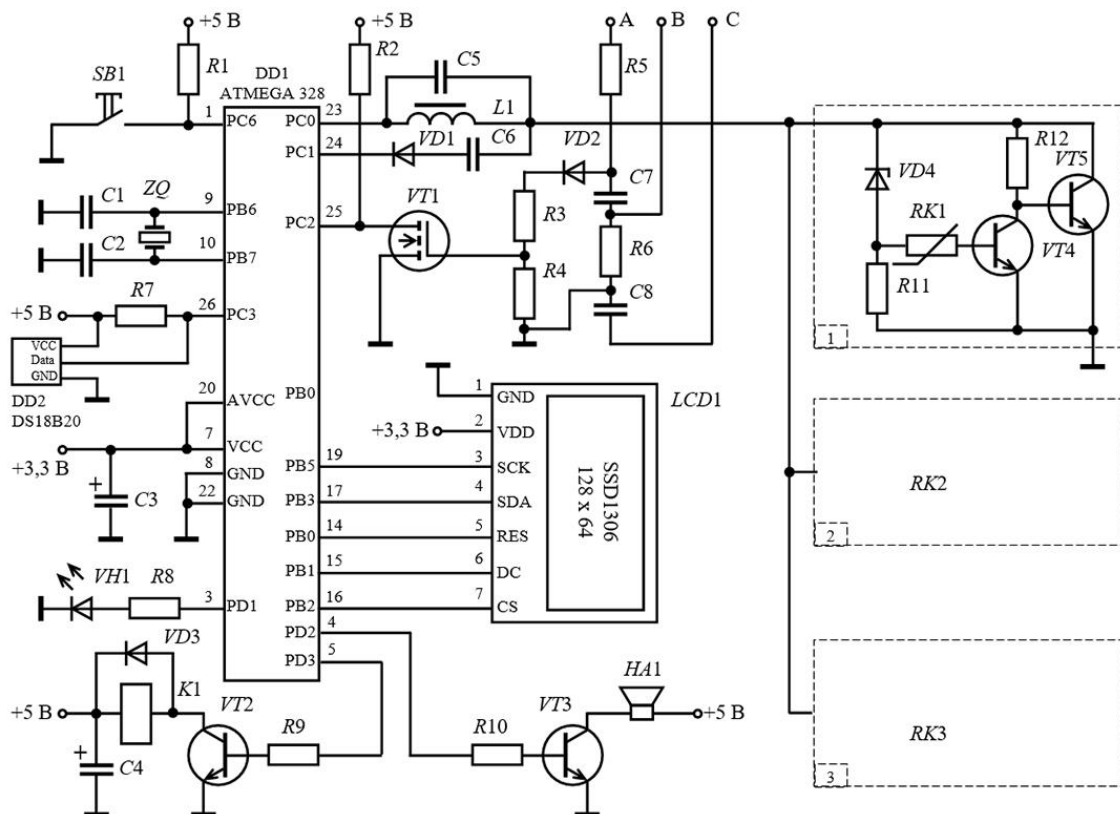


Рис. 5. Принципова схема пристрою захисту

Основою пристрою захисту є мікроконтролер *DD1* типу *ATMEGA328P*, до аналогового порту *PC0* якого через резонансний фільтр-пробку *L1-C5* підключені перетворювачі температури, виконані на аналогах негатронів. Останні виконані на біполярних транзисторах *VT4*, *VT5* і резистивного дільника напруги, до якого включений позистор *RK1*, вбудований в обмотку статора асинхронного електродвигуна. Завдяки зміні опору позистора при підвищенні температури обмотки змінюється ширина *ВАХ* негатрона, і відповідно напруга відсічки, при якій негатрон закривається.

На аналоговому порті *PC0* мікроконтролера присутня ступінчаста напруга, частота чередування якої визначається параметрами контура *L1-C5*. Кожна ступень цієї напруги відповідає своєму перетворювачу температури. При досягненні температурою обмотки статора, наприклад, першого електродвигуна припустимого значення, *ВАХ* перетворювача температури зміщується вправо і напруга відсічки, що дорівнює пороговому значенню U_{C1} , викликає в контурі *L1-C5* гармонічні синусоїдні коливання. Ця напруга через конденсатор *C6* і діод *VD1* поступає до аналогового входу *PC1*. З цього моменту мікроконтролер обчислює час припустимої роботи електродвигуна за умови припустимої витрати ресурсу ізоляції електродвигуна

$$t_{np} = T \ln \frac{\tau_y}{\tau_y - \tau_{np}}, \quad (2)$$

де T – стала часу нагріву електродвигуна, с;

τ_y – усталене перевищення температури електродвигуна, °С;

τ_{np} – припустиме значення перевищення температури, °С.

Перевищення температури обмоток статорів електродвигунів відображається на дисплеї *LCD1*. У разі підвищення швидкості зносу будь-якого двигуна обслуговуючий персонал сповіщає про це звукова сигналізація *HA1*. Якщо припустимий час роботи такого електродвигуна, який було розраховано мікроконтролером вийшов, за допомогою електронного ключа на транзисторі *VT2* котушка реле *K1* отримує живлення, а її контакти відключають живлення електродвигунів.

Контроль повнофазного режиму здійснюється за допомогою фільтру напруги зворотної послідовності, який виконано на елементах *R5-C7-R6-C8*. При обриві однієї з фаз на виході фільтру з'являється напруга, яка відчиняє транзистор *VT1*, завдяки чому на вході *PC3* мікроконтролера з'являється низький логічний рівень. На дисплейному модулі *LCD1* відображається інформація про неповнофазний режим роботи. Оскільки робота в цьому режимі супроводжується підвищенням температури обмоток електродвигунів, то алгоритм роботи аналогічний розглянутому вище.

Для обчислення перевищення температури передбачено датчик температури навколишнього середовища *DD2*, данні з якого передаються до входу РС3 мікроконтролера.

Наявність напруги живлення пристрою сповіщає світлодіод *VH1*. Скидання пристрою після спрацювання здійснюється за допомогою кнопки *SB1*.

Висновок. Розроблений пристрій захисту багатодвигунного електроприводу із застосуванням у якості перетворювача температури аналогу негatronа дозволяє підвищити експлуатаційну надійність електромеханічної системи і термін служби електродвигунів за рахунок безперервного діагностування їх технічного стану.

Список використаних джерел:

1. Закладной А. Н., Закладной О. А. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей. *Енергетика та електрифікація*. 2010. № 4. С. 63-67.
2. Manusov V., Ahyoev J. Technical diagnostics of electric equipment with the use of fuzzy logic models. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 792. P. 324–329. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.324.
3. Попова І. О., Курашкін С. Ф., Нестерчук Д. М. Захист асинхронного двигуна від несиметричних режимів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки*. Харків, 2018. Вип. 195: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 114-115.
4. Курашкін С. Ф., Попова І. О., Попрядухін В. С. Комбінований струмовий захист асинхронного електродвигуна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. Технічні науки*. Харків, 2018. Вип. 195: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 108-109.
5. Оценка пожарной опасности электродвигателей, эксплуатирующихся на промышленных предприятиях Украины / А. П. Ковалев и др. *Вісник Кременчугського державного політехнічного університета*. Кременчуг, 2004. Вип. 2 (25). С. 62-64.
6. Філінюк М. А. Основи негatronіки. Вінниця, 2006. Т. 1: Теоретичні і фізичні основи негatronіки. 456 с.

ПРИСТРІЙ ЗАХИСТУ ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Курашкін С. Ф., Попова І. О.

Анотація

Застосування багатодвигунного електроприводу у складі електромеханічної системи передбачає забезпечення його довготривалої надійної роботи не меншій за гарантований виробником термін служби. На асинхронні електродвигуни, які входять до складу електроприводу, відбувається постійний вплив різних експлуатаційних факторів, що можуть привести до їх передчасного виходу з ладу. Більшість процесів, що впливають на експлуатаційну надійність електродвигунів супроводжується прискореним тепловим зносом ізоляційної конструкції. Найбільш уразливим елементом конструкції є ізоляція обмотки статора. Для забезпечення відповідної експлуатаційної надійності електродвигунів застосовуються пристрої діагностування та захисту. Проблема контролю експлуатаційних режимів роботи силового електрообладнання та його поточного технічного стану є актуальною та ініціює розробку нових технічних засобів діагностування і захисту. Розробку проводять із використанням новітньої елементної бази, що дозволяє значно спростити схемотехніку порівняно із застосуванням класичних рішень. У роботі застосовується один з таких елементів – аналог негatronу, напівпровідниковий пристрій, який в певному режимі роботи має від'ємне значення диференційного опору. Негатрон виконує роль перетворювача температури, оскільки встановлено, що при зміні опору дільника напруги, який входить до його складу відбувається зміна ширини вольт-амперної характеристики, тобто відслідковується прямий зв'язок між температурою обмотки статора і напругою відсічки негatronа. Сигнал з перетворювача температури подається на один з аналогових портів мікроконтролера. За допомогою програмованого мікропроцесору відбувається обчислення математичної моделі процесу нагріву електродвигуна, а результатом є визначення можливості або заборони роботи електроприводу. Критерієм є час припустимої роботи під час підвищення температури обмотки статора кожного з електродвигунів, які входять до складу електроприводу. Відключення електродвигунів відбувається після розрахованої витримки часу за умови припустимої витрати ресурсу ізоляції. Застосування пристрою захисту дозволяє підвищити термін служби електродвигунів.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, надійність, діагностування, перевантаження, ресурс ізоляції, асиметрія напруги, час припустимої роботи, негatron.

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Курашкин С. Ф., Попова И. А.

Аннотация

Применение многодвигательного электропривода в составе электромеханической системы предполагает обеспечение его длительной и надежной работы не менее гарантированного производителем срока службы. На асинхронные электродвигатели, которые входят в состав электропривода, постоянно воздействуют различные эксплуатационные факторы, которые могут привести к их преждевременному выходу из строя. Большинство процессов,

влияющих на эксплуатационную надежность электродвигателей сопровождается ускоренным тепловым износом изоляционной конструкции. Наиболее уязвимым элементом конструкции является изоляция обмотки статора. Для обеспечения соответствующей эксплуатационной надежности электродвигателей применяются устройства диагностирования и защиты. Проблема контроля эксплуатационных режимов работы силового электрооборудования и его текущего технического состояния является актуальной и инициирует разработку новых технических средств диагностирования и защиты. Разработку проводят с использованием новейшей элементной базы, что позволяет значительно упростить схемотехнику по сравнению с применением классических решений. В работе применяется один из таких элементов – аналог негatrona, полупроводниковый прибор, который в определенном режиме работы имеет отрицательное значение дифференциального сопротивления. Негatron выполняет роль преобразователя температуры, поскольку установлено, что при изменении сопротивления делителя напряжения, который входит в его состав происходит изменение ширины вольтамперной характеристики, т.е. отслеживается прямая связь между температурой обмотки статора и напряжением отсечки негatrona. Сигнал с преобразователя температуры подается на один из аналоговых портов микроконтроллера. С помощью программируемого микропроцессора происходит расчет математической модели процесса нагрева электродвигателя, а результатом является определение возможности или запрета работы электропривода. Критерием является время допустимой работы при повышении температуры обмотки статора каждого из электродвигателей, входящих в состав электропривода. Отключение электродвигателей происходит после рассчитанной выдержки времени при сохранении расхода ресурса изоляции на допустимом уровне. Применение устройства защиты позволяет повысить срок службы электродвигателей.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, надежность, диагностирование, перегрузка, ресурс изоляции, асимметрия напряжения, время допустимой работы, негatron.

THREE-PHASE INDUCTION MOTORS PROTECTION DEVICE

S. Kurashkin, I. Popova

Summary

The use of multi-motor electric drive as part of electromechanical system involves ensuring its long and reliable operation not less than manufacturer's guaranteed service life. Asynchronous electric motors, which are part of the electric drive, are constantly affected by various operational factors that can lead to their premature failure. Most of processes that affect the operational reliability of electric motors are accompanied by accelerated thermal wear of the insulating structure. The most vulnerable element of the structure is insulation of the stator winding. Diagnostic and protection devices are used to ensure adequate operational reliability of electric motors. The monitoring problem of power electrical equipment operating modes and its current technical condition is relevant and initiates new technical means of diagnostics and protection development. The development is carried out using the latest element base, which greatly simplifies the circuitry compared to classical solutions. One of the following elements is used in the work – an analog of negatron, a semiconductor device, which in certain mode of operation has negative value of differential resistance. Negatron acts as a temperature converter, because it is established when the resistance of voltage divider, which is part

of it, changes the width of volt-amps diagram, i.e. there is a direct relationship between the stator winding temperature and negatron threshold voltage. The signal from temperature converter is fed to one of analog ports of microcontroller. With programmable microprocessor help, a mathematical model of induction motor heating process is calculated, and the result is determination of electric drive possibility or prohibition to work. The criterion is time of permissible operation during the stator winding temperature increase of induction motor. The electric motors switching off should occurs after calculated time endurance on condition of isolation resource losses reached a permissible level. Protection device use allows to increase the service life of electric motors.

Key word: induction motor, reliability, diagnosing, isolation resource, overload, voltage asymmetry, permitted working time, negatron.