

УДК 621.316.925

СОВРЕМЕННАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



MODERN TEMPERATURE PROTECTION FOR RELAY PROTECTION OF HIGH -VOLTAGE ELECTRIC MOTORS

Беседин Евгений Алексеевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный
технологический университет
omega54@mail.ru

Брысаев Денис Олегович

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
hamiack@mail.ru

Аннотация. В статье сделан анализ основных ненормальных режимов высоковольтных синхронных и асинхронных электродвигателей. Рассмотрены основные виды релейной защиты, применяемые для защиты высоковольтных электродвигателей. Подробно рассмотрена температурная защита высоковольтного электродвигателя на современной электронной базе. Отмечены основные преимущества рассмотренного устройства температурной защиты электродвигателей.

Ключевые слова: ненормальные режимы электродвигателей, релейная защита высоковольтных электродвигателей, температурная защита высоковольтных электродвигателей, прогнозирование ненормального режима.

Besedin Evgeniy Alexeevich

Candidate of technical sciences,
Associate Professor, Associate Professor
of the department of power supply
of industrial enterprises,
Kuban state technological university

Brysaev Denis Olegovich

Student,
Kuban state technological university

Annotation. The article analyzes the main abnormal modes of high -voltage synchronous and asynchronous electric motors. The main types of relay protection used to protect high-voltage electric motors are considered. The temperature protection of a high- voltage electric motor on a modern electronic basis is considered in detail. The main advantages of the considered device for temperature protection of electric motors are noted.

Keywords: abnormal modes of electric motors , relay protection of high-voltage electric motors , temperature protection of high – voltage electric motors, prediction of abnormal pressure.

К основным видам повреждений для асинхронных и синхронных двигателей относятся многофазные короткие замыкания, замыкания на землю одной фазы и витковые замыкания в одной фазе. Для синхронных электродвигателей, кроме того, опасными являются обрывы в цепях возбуждения, приводящие к асинхронному режиму.

К ненормальным режимам двигателей всех видов относятся сверттоки технологической перегрузки, при понижении напряжения, при обрыве фазы. В синхронном электродвигателе, кроме того, сверттоки возникают при переходе в аварийный режим.

При *многофазных коротких замыканиях* существенно возрастает ток, термическое действие которого ведет к повреждению изоляции всей обмотки, пережогу проводников и выплавлению железа статора электрической дугой.

Однофазное замыкание на землю в сети с глухозаземленной нейтралью является однофазным коротким замыканием и его последствия также опасны, как при многофазных повреждениях. Если же нейтраль системы заземлена через дугогасящие реакторы или изолирована, то опасность такого повреждения проявится лишь при замыкании на землю в другой точке. В этом случае возникает двухфазное короткое замыкание (двойное замыкание на землю).

При *витковых замыканиях в одной фазе* двигателей переменного тока происходит местный перегрев изоляции из-за увеличения тока в замкнувшихся накоротко витках и ее разрушение. Кроме того, дополнительные разрушения вызываются и электрической дугой между замкнувшимися витками. Эти же явления имеют место при витковом замыкании в якоре двигателей постоянного тока.

Обрывы в цепи возбуждения синхронных двигателей сопровождаются значительным увеличением тока статора и переходом в асинхронный режим. Однако такие обрывы чрезвычайно редки и защита от такого повреждения устанавливается только для мощных электродвигателей.

Обрывы в цепи полюсов электродвигателей постоянного тока с параллельным или независимым возбуждением приводят в режиме холостого хода к разному, при котором частота вращения якоря резко увеличивается, и он может разрушиться. Если же на валу двигателя имеется нагрузка, то он остановится. Поскольку в остановленном якоре ЭДС не наводится, то значительно возрастает ток якоря, что может привести к разрушению изоляции.

При *технологических перегрузках*, когда тормозной момент приводимого во вращение механизма превышает длительно допустимое значение, возрастает потребляемый двигателем из сети ток и его термическое действие может разрушить изоляцию.

Такое же явление имеет место при *понижении напряжения* для синхронных, асинхронных двигателей переменного тока и для двигателей постоянного тока (кроме двигателей с последовательным возбуждением). Снижение напряжения уменьшает момент вращения на валу, при этом синхронный двигатель может перейти в асинхронный режим, а для асинхронного двигателя возможно «опрокидывание», т.е. остановка. Возрастающий при этом ток вызывает перегрев двигателей.

При коротком замыкании в цепи, питающей группу электродвигателей, напряжение снижается особенно сильно и двигатели останавливаются. После автоматического отключения поврежденного элемента напряжение восстанавливается и все двигатели переходят в режим самозапуска. В этом режиме электродвигатель потребляет ток, в несколько раз превышающий номинальное значение. При нормальном напряжении этот режим не опасен из-за своей кратковременности. Однако, если в режиме самозапуска всех двигателей суммарный ток будет слишком велик, то из-за увеличенного падения напряжения в сети уровень напряжения окажется значительно ниже номинального, что затягивает и затрудняет процесс самозапуска двигателей и может привести к их перегреву.

Во избежание такой ситуации менее ответственные двигатели, а также двигатели, для которых самозапуск недопустим по технологическим причинам, при снижении напряжения следует отключать.

Обрыв фазы чаще всего имеет место при перегорании предохранителя в одной фазе. При этом уменьшается вращающий момент на валу и увеличивается ток статора. Защита от этого режима осуществляется, как правило, защитой от перегрузки.

Релейная защита электродвигателей напряжением 1000 В должна правильно реагировать на внутренние повреждения электродвигателя и на опасные для него ненормальные режимы. Необходимо, чтобы электродвигатели не отключались защитой при ненормальных режимах, не грозящих повреждением электродвигателя или приводимого им механизма, и не опасных для питающей сети.

Защиту электродвигателей необходимо выполнять возможно более простой, что повышает ее надежность. Требование надежности для защиты электродвигателей напряжением выше 1000 В особенно важно, так как отказ основной защиты даже при надежном действии защиты, установленной на следующем участке, обычно приводит к серьезным разрушениям, требующим длительного ремонта или полной замены электродвигателя. Поэтому следующим основным требованием к защите от многофазных коротких замыканий (к.з.) в электродвигателе является быстрота действия, вследствие чего данная защита выполняется без выдержки времени.

Чувствительность этой защиты принято оценивать коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}}$ из отношения:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.з.мин}}}{I_{\text{с.з.}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{к.з.мин}}$ – ток двухфазного к.з. на выводах обмотки статора в минимальном режиме питающей сети; $I_{\text{с.з.}}$ – первичный ток срабатывания защиты.

Чувствительность защиты электродвигателя от многофазных к.з. считается достаточной при условии, если коэффициент чувствительности находится в пределах

$$k_{\text{ч}} \geq 2. \quad (2)$$

Защиту от однофазных замыканий на землю по приведенным ранее соображениям целесообразно устанавливать только в том случае, если значение тока замыкания на землю в сети, питающей электродвигатель, превышает 5 А. В небольших сетях, например, в сетях собственных нужд электростанций, а также и в протяженных сетях, где емкостные токи при однофазных замыканиях на землю достаточно точно скомпенсированы токами дугогасящих реакторов, значение остаточного тока не превышает 5 А.

С целью упрощения на электродвигателях мощностью 2000 кВт и менее ПУЭ обязывают устанавливать защиту от замыкания на землю, если ток замыкания на землю достигает 10 А и более. Ток срабатывания этой защиты для электродвигателей до 2000 кВт включительно должен быть около 10 А.

Допускается иметь первичные токи срабатывания и меньшей величины, если это не вызывает усложнения защиты.

Требование быстродействия не является решающим для данной защиты, поскольку токи однофазного замыкания на землю малы. Поэтому допустимо вводить в защиту выдержку времени 1–2 с, если без этого нельзя получить необходимую чувствительность защиты.

Двойные замыкания на землю, сопровождающиеся прохождением больших токов, опасны, как и многофазные к.з., и должны отключаться защитой без выдержки времени, если одно из мест повреждения находится в электродвигателе. Защита электродвигателя от многофазных к.з. при этом может обеспечить работу без выдержки времени только в тех случаях, когда чувствительность ее достаточна и замыкание на землю в электродвигателе произошло на одной из тех фаз, на которых установлены трансформаторы тока защиты (обычно фазы А и С).

Поэтому целесообразно возложить функции отключения электродвигателя при двойных замыканиях на землю на защиту электродвигателя от однофазных замыканий на землю, которая при двойных замыканиях на землю, связанных с электродвигателем, будет действовать с достаточно высокой чувствительностью.

В тех случаях, когда защита от однофазных замыканий на землю имеет выдержку времени, для защиты от двойных замыканий на землю необходимо установить дополнительно реле тока, имеющее ток срабатывания около 50–100 А, действующее без дополнительной выдержки времени.

Если защита от однофазных замыканий на землю при малых токах замыкания на землю не установлена, то защита от многофазных к.з. электродвигателей мощностью 2000 кВт и более, в качестве которой используется отсечка (а при установке дифференциальной защиты независимо от мощности двигателя) для надежного действия при двойных замыканиях на землю в разных точках, в соответствии с ПУЭ должна иметь

Правилами устройства электроустановок не предусматривается установка защиты электродвигателей напряжением выше 1000 В от витковых замыканий в одной фазе обмотки статора, так как в настоящее время нет простых способов выполнения такой защиты. Этот вид повреждения обычно сопровождается замыканием на землю или переходит в многофазное к.з., после чего действует защита от однофазных замыканий на землю или защита от многофазных к.з.

Правилами устройства электроустановок не предусматриваются также защиты от повреждений в цепях возбуждения. Однако для крупных синхронных электродвигателей необходима защита от обрыва цепи возбуждения. Применение ее нужно считать особо полезным в связи с тем, что при выходе электродвигателя из синхронизма, вызванном обрывом цепи возбуждения, защита от асинхронного режима, выполненная по любой схеме, обычно отказывает.

Появление замыканий на землю в цепях возбуждения синхронных электродвигателей должно предотвращаться периодическими проверками состояния изоляции цепей возбуждения.

Основным видом ненормального режима для электродвигателей является перегрузка током. Поэтому на электродвигателях, подверженных перегрузкам, должна

устанавливается токовая защита, которая с выдержкой времени при длительной перегрузке будет действовать на сигнал или на отключение электродвигателя. Если позволяют условия, целесообразно осуществлять действие этой защиты на разгрузку приводимого механизма.

Ненормальным режимом для электродвигателя является также исчезновение или длительное снижение напряжения. В тех случаях, когда самозапуск электродвигателя не обязателен, то по технологическим соображениям, по условиям безопасности персонала или для ограничения суммарного тока самозапуска бывает целесообразна установка минимальной защиты напряжения, отключающей электродвигатель при исчезновении или снижении напряжения.

Синхронные электродвигатели напряжением выше 1000 В при значительных длительных (более 0,5 с) снижениях напряжения или перегрузках могут выйти из синхронизма. Синхронные электродвигатели не рассчитаны на длительный асинхронный режим и должны иметь защиту от него, действующую на восстановление нормального синхронного режима или на отключение.

Одним из перспективных решений защиты высоковольтных электродвигателей является температурная защита, приведенная в [3, 4]. Более подробно рассмотрим устройство температурной защиты, приведенное в [3]. Указанное устройство относится к области релейной защиты, а более конкретно к системе защиты, реагирующей на отклонения от нормальной температуры, и может быть использовано для защиты электродвигателей от перегрузки.

На рисунке 1 представлена структурная схема устройства; на рисунке 2 – пусковой орган устройства; на рисунке 3 – диаграмма нагрева электродвигателя.

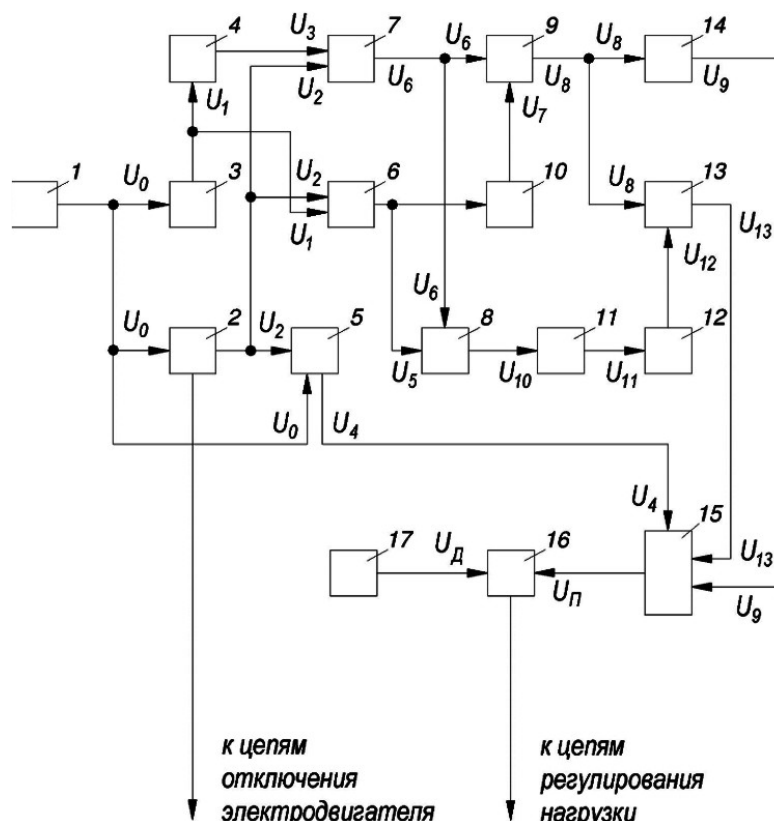


Рисунок 1 – Структурная схема устройства температурной защиты электродвигателя

Устройство содержит датчик 1 (рис. 1) нагрева обмоток, выход которого подключен к входу пускового органа 2 и первого блока 3 дифференцирования, выход которого подключен к входу второго блока 4 дифференцирования. Выход пускового органа 2 соединен с вторыми входами первого, второго, третьего блоков 5–7 стробирования, выход третьего блока 7 стробирования подключен к первым входам первого и второго блоков

8 и 9 деления, к входу второго блока 9 деления подключен выход квадратичного преобразователя 10. Выход первого блока 8 деления через последовательно соединенные пропорциональный преобразователь 11 и функциональный преобразователь 12 соединен с первым входом блока 13 умножения, второй вход которого соединен с выходом второго блока 9 деления и входом инвертора 14, выходы блока 13 умножения и инвертора 14 подключены соответственно к второму и третьему входам сумматора 15, к первому входу которого подключен выход первого блока 5 стробирования. Выход сумматора 15 соединен с первым входом элемента 16 сравнения, к второму входу которого подключен задатчик 17 максимально допустимого нагрева.

Пусковой орган 2 (рис. 2) включает в себя два термореле 18 и 19 с разными уставками срабатывания.

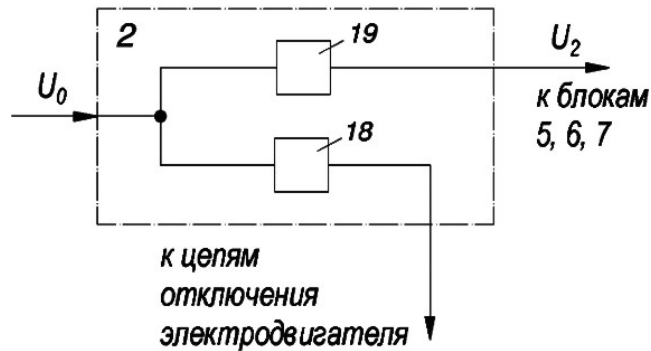


Рисунок 2 – Структурная схема пускового органа устройства температурной защиты

Термореле 18 реагирует на превышение максимально допустимой температуры нагрева обмотки электродвигателя, а термореле 19 реагирует на температуру, меньшую максимально допустимой. Блоки 5–7 стробирования выполняются на базе электронных ключей. Функциональный преобразователь 12 известных устройств предназначен для получения сигнала в экспоненциальной форме.

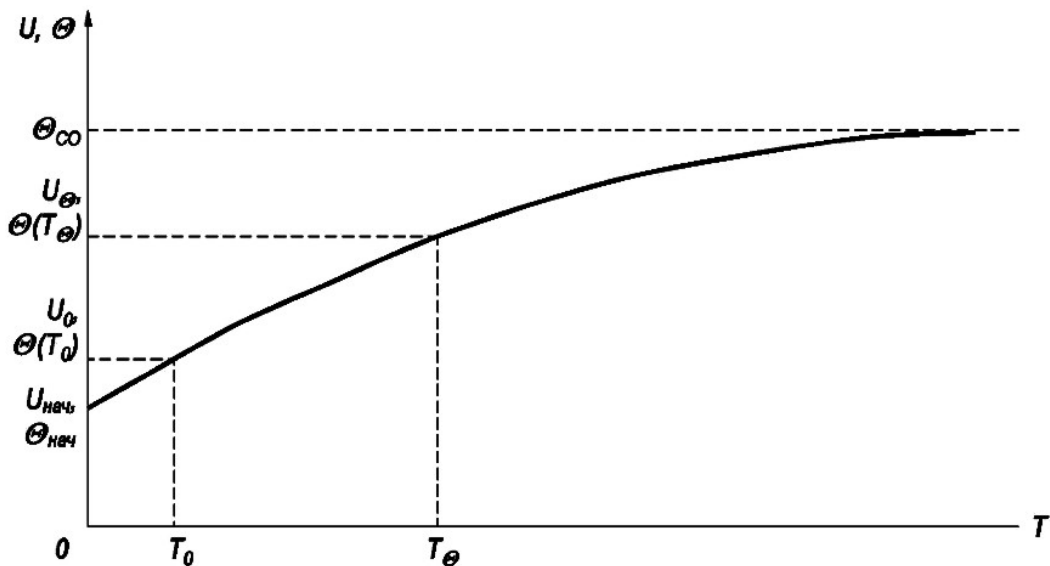


Рисунок 3 – Диаграмма нагрева электродвигателя

Устройство работает следующим образом.

С выхода датчика 1 нагрева обмотки электродвигателя (рис. 1) сигнал U_0 , пропорциональный температуре нагрева обмотки электродвигателя, поступает в пусковой орган 2, первый блок 3 дифференцирования и первый блок 5 стробирования. В блоке 3 сигнал U_0 дифференцируется, на выходе блока 3 появляется сигнал $U_1 = U'_0$, который затем разветвляется во второй блок 4 дифференцирования и на первый вход второго

блока 6 стробирования. Пусковой орган 2 (рис. 2) функционирует в зависимости от величины сигнала U_0 .

В случае, когда $U_0 > U_D$ (U_D – сигнал, пропорциональный максимально допустимой температуре нагрева обмотки электродвигателя), срабатывает термореле 18, подающее команду на отключение электродвигателя от сети.

В случае, когда $U_{ном} < U_0 < U_D$ ($U_{ном}$ – сигнал, пропорциональный номинальной температуре нагрева обмотки электродвигателя), срабатывает термореле 19 (рис. 2). Этому режиму соответствует момент времени T_0 (рис. 3). Выход термореле 19 связан с вторыми входами блоков 5–7 стробирования. При его срабатывании на указанные входы блоков 5–7 поступает управляющий сигнал U_2 , который запускает их. Кроме того, на первый вход третьего блока стробирования поступает сигнал $U_3 = U_0''$.

Стробирование сигналов U_0 , U_1 и U_3 происходит в момент времени T_0 . В результате стробирования на выходе блока 5 появляется сигнал $U_4 = U_0(T_0)$, на выходе блока 6 появляется сигнал $U_5 = U_0'(T_0)$, на выходе блока 7 появляется сигнал $U_6 = U_0''(T_0)$. Сигнал U_5 в квадратичном преобразователе умножается сам на себя. В результате этого на выходе квадратического преобразователя 10 формируется сигнал $U_7 = [U_0'(T_0)]^2$. Во втором делителе 9 сигнал U_7 делится на сигнал U_6 , в результате чего на выходе делителя 9 появляется сигнал $U_8 = [U_0'(T_0)]^2 / [U_0''(T_0)]$. В первом делителе 8 сигнал U_6 делится на сигнал U_5 , в конечном итоге получается сигнал $U_{10} = [U_0''(T_0)] / [U_0'(T_0)]$, который затем умножается в K – раз в пропорциональном преобразователе 11. Здесь K – постоянная величина, зависящая от настройки устройства. С выхода пропорционального преобразователя 11 сигнал $U_{11} = K U_{10}$ поступает в функциональный преобразователь 12, где он приводится в экспоненциальной форме и приобретает вид $U_{12} = \exp[K U_{10}]$. Сигналы U_8 и U_{12} перемножаются в блоке 13, на выходе которого формируется сигнал:

$$U_{13} = \frac{[U_0'(T_0)]^2}{U_0''(T_0)} \cdot \exp\left[K \cdot \frac{U_0''(T_0)}{U_0'(T_0)}\right]. \quad (3)$$

Кроме того, сигнал U_8 при прохождении через инвертор 14 заменяет знак, т.е. сигнал на выходе инвертора $U_9 = -U_8$. Сигналы U_4 , U_9 , U_{13} складываются между собой в сумматоре 15. Результирующий сигнал:

$$U_n = U_0(T_0) - \frac{[U_0'(T_0)]^2}{U_0''(T_0)} + \frac{[U_0'(T_0)]^2}{U_0''(T_0)} \cdot \exp\left[K \cdot \frac{U_0''(T_0)}{U_0'(T_0)}\right], \quad (4)$$

сравнивается в элементе 16 с сигналом U_D , задаваемом в задатчике 17 максимально допустимого нагрева. В случае выполнения условия $U_n > U_D$ на выходе элемента 16 сравнения появляется сигнал $U_{ц}$, управляющий цепями регулирования нагрузки. При этом происходит разгрузка электродвигателя. В случае $U_n \leq U_D$ разгрузка электродвигателя не происходит. Формирование сигнала U_n позволяет прогнозировать температуру нагрева обмотки электродвигателя, которая может наступить в результате его перегрузки, что позволяет принять необходимые меры по облегчению режима работы электродвигателя заранее, не дожидаясь наступления перегрева последнего. В случае, когда сброс нагрузки не ограничивает нагрев электродвигателя, после превышения

максимально допустимой температуры обмотки электродвигателя, срабатывает термореле 18, с выхода которого к цепям подключения электродвигателя поступает сигнал на отключение последнего от сети.

Данное устройство позволяет осуществить возможность прогнозирования температуры нагрева обмотки электродвигателя от перегрузки, основанная на учете температуры нагрева непосредственно. Это позволяет существенно повысить надежность и точность защиты электродвигателя, что является техническим преимуществом предлагаемого устройства по сравнению с известными решениями.

Кроме того, улучшается режим работы технологического оборудования, приводимого электродвигателем, и увеличивается срок службы изоляции электродвигателя, а значит, и самого электродвигателя в целом.

Литература

1. Корогодский В.И., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
2. Фигурнов Е.П. Релейная защита : учебник для вузов ж.-д. трансп. – М. : Желдориздат, 2002. – 720 с.
3. А.С. 1372449 СССР Н 02 Н 5/04. Устройство для температурной защиты электродвигателя / Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко, Е.А. Беседин, А.М. Смаглиев и Е.И. Гарькуша. – № 4108511/24-07. – Заявл. 17.06.86. – Оpubл. 07.02.88. – Бюл. № 5.
4. А.С. 1474783 СССР Н 02 Н 5/04. Устройство для температурной защиты электродвигателя / Б.А. Коробейников, С.В. Щербин, А.И. Ищенко, Е.А. Беседин и А.М. Смаглиев. – № 4286650/24-07. – Заявл. 20.07.87. – Оpubл. 23.04.89. – Бюл. № 15.

References

1. Korogodsky V.I., Kuzhekov S.L., Paperno L.B. Relay protection of electric motors with a voltage higher than 1 kV. – M. : Energoatomiz-DAT, 1987. – 248 p.
2. Figurnov E.P. Relay protection : Textbook for universities W.– Di. transposition. – M. : Jeldorado, 2002. – 720 p.
3. A.S. 1372449 USSR N 02 H 5/04. Device for temperature protection of the electric motor / B.A. Korobeynikov, A.I. Ishchenko, E.A. Besedin, A.M. Smagliev And E.I. Garkusha. – Number 4108511/24-07. – Declared. 17.06.86. – Publ. 07.02.88. – Bull № 5.
4. A.S. 1474783 USSR N 02 H 5/04. Device for temperature protection of the electric motor / B.A. Korobeynikov, S.V. Shcherbin, A.I. Ishchenko, E.A. Besedin and A.M. Smagliev. Number 4286650/24-07. – Declared. 20.07.87. – Publ. 23.04.89. – Bull № 15.