

## ОПЕРАТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Полковниченко Д. В.

Донецкий государственный технический университет

dima@pandora.kita.dgtu.donetsk.ua

*Main principles and are considered expediency of creation of an operative diagnostic system of electrical equipment of own needs of power stations is justified. Results of laboratory researches on determination of diagnostic parameters are indicated, on the basis of which two techniques of diagnostics of breakages of rods of a rotor of a asynchronous engine are developed. Algorithm of increase of accuracy of measurement of currents the current transformers is indicated.*

В настоящее время во многих странах, в том числе в странах СНГ, активно проводятся работы по созданию систем диагностики генераторов и трансформаторов. В тоже время ведется мало работ по диагностике электрооборудования собственных нужд (с.н.) электростанций и практически отсутствуют разработанные методы автоматизированной диагностики.

Актуальность разработки и применения автоматизированной системы технической диагностики (АСТД) основного электрооборудования на тепловых электростанциях и промышленных предприятиях Донбасса обусловлена рядом причин. Основной причиной в настоящее время является достижение оборудованием критического срока эксплуатации, в среднем составляющего 15-20 лет. Поэтому сейчас начинается период постепенного учащения отказов, связанных с износом и старением элементов электроустановок, а следовательно, происходит в целом резкое снижение надежности работы энергосистемы. В качестве второго довода в пользу более быстрого внедрения технической диагностики следует учитывать то, что средства диагностики во многих случаях выполняют функции более чувствительной защиты, чем релейная защита. В-третьих, техническая реализация диагностики позволяет путем относительно несложных дополнений в виде программ расчетов решать задачи контроля и оптимального управления технологическим процессом выработки электроэнергии. В-четвертых, следует иметь в виду то, что в настоящее время на ТЭС имеется достаточное количество ПЭВМ, которые могут быть использованы для практической реализации АСТД.

Для обеспечения устойчивой работы электрической станции требуется надежная работа всех механизмов собственных нужд, приводом которых являются в основном асинхронные электродвигатели (АД). Как показывает практика наиболее часто встречающейся и трудно поддающейся контролю неисправностью короткозамкнутого ротора (КЗР) АД является обрыв стержней клетки. В работе [1] приводятся данные, по которым средняя повреждаемость АД за последние три года на одной из ТЭС составила 19,8 % при общем числе двигателей 140, а обрывы стержней ротора среди них - 23,7 %, то есть примерно каждое четвертое повреждение.

В настоящее время для определения технического состояния электродвигателей с.н. отсутствует единая концепция диагностирования, существуют и применяются отдельные методики. Одной из них являются экспресс - испытания, которые проводятся до и после ремонта оборудования, а также в межремонтный период. Основным недостатком большинства этих методик является то, что их использование возможно либо на неработающем двигателе, либо при пуске АД, что неприемлемо для использования в оперативной диагностике.

При разработке методики диагностики обрывов стержней АД с КЗР было выдвинуто и обосновано требование использовать только датчики, которые уже имеются на присоединениях с.н. электростанций (трансформаторы тока и напряжения). Исходя из этого, диагностические параметры выбирались так, чтобы их можно было измерять или рассчитывать с помощью этих датчиков.

Для выявления наиболее информативных параметров, характеризующих установившийся режим работы АД с КЗР, были проведены экспериментальные исследования на специальном стенде в лаборатории кафедры «Электрические станции». Для этого использовался специальный двигатель, ротор которого модернизирован с целью обеспечения возможности имитации обрывов стержней обмотки. Измерение режимных параметров выполнялось с помощью цифрового устройства регистрации параметров режима (УРПР), в котором используются десятиразрядные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) К1113ПВ1 и персональная ЭВМ. При подготовке к проведению испытаний была применена теория планирования эксперимента.

Наличие тока обратной последовательности АД может быть обусловлено двумя основными причинами:

- наличие несимметрии питающего напряжения;
- наличие повреждения в двигателе.

Критерием оценки несимметрии напряжений, адекватно отражающим энергетический процесс трехфазных систем, считается коэффициент обратной последовательности [2]:

$$K_{2U} = 100 \frac{U_{2(1)}}{U_{ном}} \approx 100 \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}}, \quad (1)$$

где  $U_{2(1)}$  - действующее значение напряжения обратной последовательности первой гармоники трехфазной системы напряжений, В;

$U_{1(1)}$  - действующее значение напряжения прямой последовательности первой гармоники, В;

$U_{ном}$  - номинальное значение междуфазного напряжения, В.

Разработанный алгоритм диагностики АД с КЗР по току обратной последовательности имеет следующую последовательность.

1. Рассчитываются период и частота тока. Это вызвано тем, что частота в сети не всегда равна 50 Гц.

2. Определяются фазы токов  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ .

3. По мгновенным значениям фазных токов определяются их вектора  $\bar{I}_A, \bar{I}_B$  и  $\bar{I}_C$ .

4. Рассчитывается ток прямой последовательности  $\bar{I}_1$  по выражению:

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3}(\bar{I}_A + a\bar{I}_B + a^2\bar{I}_C).$$

5. Рассчитывается ток обратной последовательности  $\bar{I}_2$  по выражению:

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3}(\bar{I}_A + a^2\bar{I}_B + a\bar{I}_C).$$

6. По мгновенным значениям фазных напряжений определяются их вектора  $\bar{U}_A, \bar{U}_B$  и  $\bar{U}_C$ .

7. Рассчитывается напряжение прямой последовательности  $\bar{U}_1$  по выражению:

$$\bar{U}_1 = \frac{1}{3}(\bar{U}_A + a\bar{U}_B + a^2\bar{U}_C).$$

8. Рассчитывается напряжение обратной последовательности  $\bar{U}_2$  по выражению:

$$\bar{U}_2 = \frac{1}{3}(\bar{U}_A + a^2\bar{U}_B + a\bar{U}_C).$$

9. По выражению (1) определяется коэффициент обратной последовательности по напряжению  $K_{2U}$ .

10. Определяется коэффициент обратной последовательности по току  $K_{2I}$  по выражению:

$$K_{2I} = 100 \frac{I_{2(1)}}{I_{ном}} \approx 100 \frac{I_{2(1)}}{I_{1(1)}},$$

где  $I_{2(1)}$  - действующее значение тока обратной последовательности первой гармоники, А;

$I_{1(1)}$  - действующее значение тока прямой последовательности первой гармоники, А;

$I_{ном}$  - номинальное значение тока, А.

11. По величине  $K_{2U}$  и  $K_{2I}$  делается вывод о причине появления тока обратной последовательности.

Результаты лабораторных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований установившегося режима работы экспериментального АД

Число Оборванных Стержней	$K_{2U}, \%$	$K_{2I}, \%$	P/S, о.е.
0	1.95	2.15	5.81
1	1.95	2.47	5.34
2	1.95	2.83	4.95
3	1.95	3.01	4.62

Как видно из табл. 1, коэффициенты обратной последовательности, рассчитываемые по току и по напряжению, близки по величине (около 2 %). При появлении оборванного стержня КЗР коэффициент обратной последовательности, рассчитываемый по току обратной последовательности, возрастает по сравнению с коэффициентом обратной последовательности, рассчитываемым по напряжению обратной последовательности.

Таким образом, увеличение разности между коэффициентами обратной последовательности, рассчитанными соответственно по току и по напряжению, может служить признаком обрыва стержней КЗР АД. Для экспериментального АД таким признаком может быть разность равная 0.5%.

Однако, изменение такого диагностического параметра как ток обратной последовательности происходит в незначительных пределах. Поэтому, в общем виде новое требование к измерительным каналам тока, используемым в системе диагностики, было сформулировано следующим образом. Погрешность канала не должна превышать минимально возможное изменение диагностического параметра (тока).

Принципиально возможно учесть погрешность преобразования измерительного трансформатора тока (ТТ) и соответствующим образом скорректировать вторичный ток, т.е. повысить точность передачи первичного тока. Для этого выполнена разработка модели измерительного канала тока, включающего схему замещения ТТ и АЦП, алгоритма и программы расчета на персональной ЭВМ первичного тока трансформатора тока по известному вторичному [3].

Алгоритм определения первичного тока по известному вторичному току имеет следующую последовательность.

1. По известному вторичному току определяется потокосцепление вторичной обмотки ТТ:

$$\psi_2 = (R_n + R_2) \int i_2 dt + (L_{2\sigma} + L_n) i_2,$$

где  $R_n, L_n$  - активное сопротивление и индуктивность нагрузки;

$R_2$  - сопротивление вторичной обмотки ТТ;

$L_{2\sigma}$  - индуктивность рассеивания вторичной обмотки ТТ;

Для двух последовательных значений  $i_2(1)$  и  $i_2(2)$ , отстоящих на время, равное шагу расчета  $\Delta t$ , приближенное значение потокосцепления определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_2 &= (R_n + R_2) \frac{i_2(1) + i_2(2)}{2} \Delta t + (L_{2\sigma} + L_n) \frac{i_2(1) + i_2(2)}{2} = \\ &= \frac{i_2(1) + i_2(2)}{2} [(R_n + R_2) \Delta t + (L_{2\sigma} + L_n)]. \end{aligned}$$

2. По найденному значению потокосцепления определяется магнитная индукция  $B_i$ :

$$B_i = \frac{\psi_2}{S W_2},$$

где  $S$  - сечение магнитопровода;

$W_2$  - число витков вторичной обмотки ТТ.

3. По характеристике намагничивания, заданной в виде таблицы, путем аппроксимации определяется напряженность  $H_i$ .

4. Рассчитывается мгновенное значение тока намагничивания, приведенного к вторичной обмотке:

$$i_{0i} = \frac{H_i L_{cp}}{W_2},$$

где  $L_{cp}$  - средняя длина магнитопровода.

5. Мгновенное значение первичного тока, приведенное к вторичной обмотке:

$$i_{1i} = i_{0i} + \frac{i_2(1) + i_2(2)}{2}.$$

6. Мгновенное значение первичного тока:

$$i_{1i} = i_{1i} \frac{W_2}{W_1},$$

где  $W_1$  - число витков первичной обмотки ТТ.

При разработке алгоритма восстановления первичного тока были приняты следующие допущения:

1) не учитывались активные сопротивления и индуктивности рассеяния первичных обмоток трансформатора тока;

2) индуктивности рассеяния вторичной обмотки трансформатора тока и нагрузки - линейные;

3) не учитывались активные потери в ферромагнитном сердечнике.

Оценка адекватности математической модели проверялась с помощью реальных экспериментальных данных для нормального режима  $0.37I_{1ном.тт}$  и режима насыщения  $4.67I_{1ном.тт}$  для трансформатора тока типа УТТ-5. На рис. 1-2 приведены графики изменения первичного тока, восстановленного при помощи выше приведенного алгоритма, и первичного тока полученного экспериментальным путем для нормального режима работы ТТ и режима насыщения.

Алгоритм восстановления первичного тока трансформатора тока по известному вторичному току реализован в виде программы, которая учитывает конкретное конструктивное исполнение ТТ и позволяет выполнять расчеты как в установившемся, так и в переходных режимах.

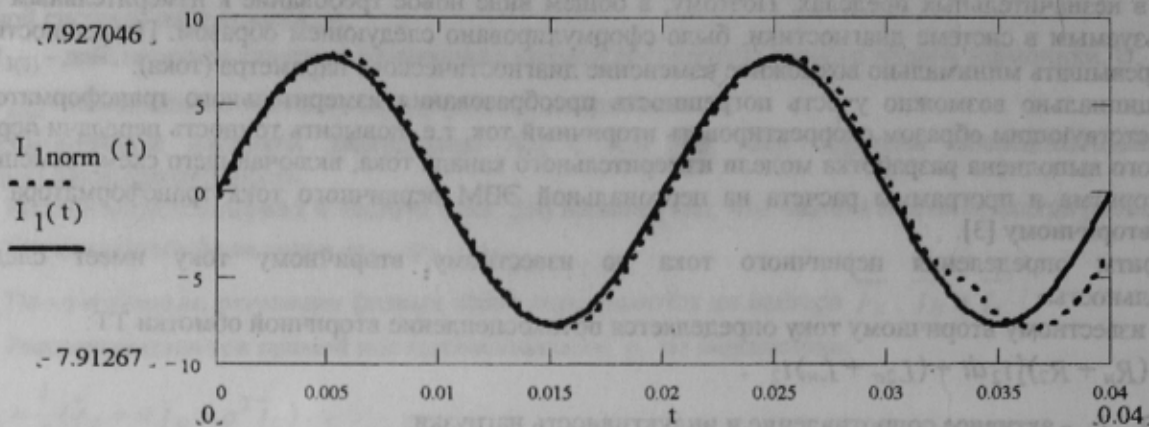


Рисунок 1 – Графики восстановленного первичного тока  $I_1(t)$  и первичного тока  $I_{1norm}(t)$ , полученного экспериментально в нормальном режиме работы ТТ

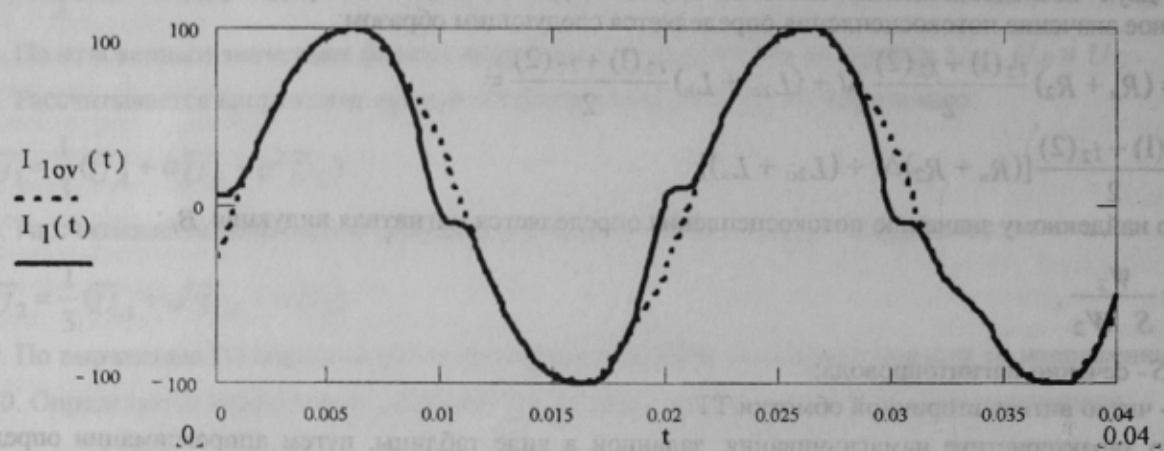


Рисунок 2 – Графики восстановленного первичного тока  $I_1(t)$  и первичного тока  $I_{1ov}(t)$ , полученного экспериментально в режиме насыщения ТТ

Известно, что при обрыве стержня обмотки ротора происходит снижение потребляемой активной мощности АД и одновременно уменьшается частота вращения ротора, т.е. увеличивается скольжение АД. Проведенные экспериментальные исследования и расчеты показали, что хорошей информативностью как диагностический параметр обладает отношение мощности на валу АД  $P$  к скольжению  $S$  двигателя (см. табл.1).

Алгоритм разработанного метода автоматизированной диагностики состояния роторной обмотки АД приведен на рис. 1. Он основан на контроле изменения величины соотношения активной мощности потребляемой АД и скольжения. Расчет мощности производится по выражению:

$$P = u_{ab} i_a + u_{cb} i_c.$$

Использование при расчете мощности токов двух фаз позволяет рассчитывать ее для двигателя любого присоединения системы с.н. электростанции, т.к. в основном на присоединении устанавливаются трансформаторы тока только в двух фазах.

Так как на двигателях с. н. не устанавливаются датчики частоты вращения, скольжение определяется как частота колебаний рабочего тока статора по выражению:

$$S = \frac{2}{t_{кол}}$$

где  $S$  - скольжение АД, %;

$t_{кол}$  - период колебаний рабочего тока статора, с.

На электродвигателях электротехнических комплексов можно производить периодический контроль соотношения  $P/S$  (например, один раз в неделю), а там где возможно подключить датчик частоты вращения, расчет скольжения производить с его помощью.

Как показали проведенные лабораторные эксперименты, диагностический параметр  $P/S$  практически не зависит от нагрузки АД и для использованного экспериментального двигателя может быть принят равным 5,7. Если отношение  $P/S$  снизится ниже этого значения, то это свидетельствует о появлении обрыва стержней короткозамкнутого ротора АД [4].

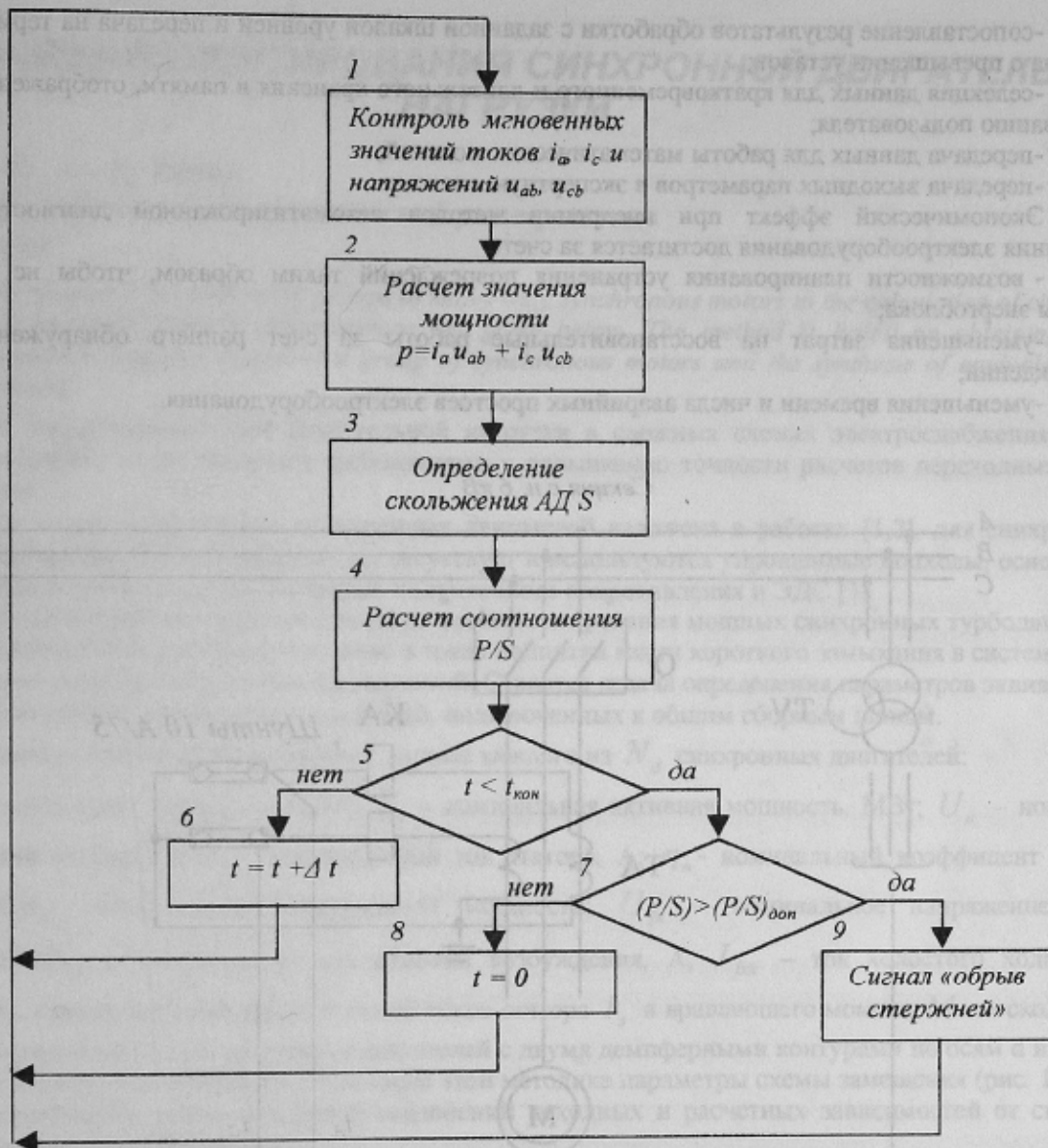


Рисунок 3 - Блок-схема алгоритма автоматизированной системы диагностики обрывов стержней обмотки ротора АД

Правильность принципов разработанной системы диагностики была проверена на блоке №3 300 МВт Зуевской ТЭС – 2 путем проведения экспериментальных исследований.

Фиксация параметров режимов (фазных токов и линейных напряжений) выполнялась, как и при лабораторных испытаниях, с помощью УРПР. Обследование выполнено на электродвигателях, являющихся приводом дымососа (1700 кВт), бустерного насоса (500 кВт) и дымососа рециркуляции газов (630 кВт). Для подключения в токовые цепи трансформаторов тока электродвигателей использовались токовые клеммы, имеющиеся в ячейках выключателей. Принципиальная схема контроля параметров при проведении натурных экспериментов приведена на рис. 4.

Предложенные методики выявления обрывов стержней КЗР АД могут применяться наряду с подобными методиками выявления других повреждений (ухудшение состояния изоляции, вибрация подшипников и др.) в общей системе автоматизированной диагностики технического состояния электрооборудования собственных нужд электростанции. Однако, эти методики можно использовать и для периодического контроля за техническим состоянием отдельного или ряда асинхронных электродвигателей промышленных предприятий, но для большей эффективности периодичность должна быть как можно меньше.

Разработанные методы могут также использоваться в автоматизированных экспертных системах диагностики для оценки эксплуатационного состояния электрооборудования. Экспертные системы при выработке заключения используют три вида информации: выходные параметры контроля системы централизованного контроля (СЦК), выходные данные математических моделей, документальную информацию об «истории жизни» объекта [5]. При этом средствам предложенных методов диагностики может быть отведена роль СЦК и поручены следующие функции:

- сбор и автоматическая обработка измерительной информации;

- сопоставление результатов обработки с заданной шкалой уровней и передача на терминал пользователя сигнала о превышении уставок;
  - селекция данных для кратковременного и длительного хранения в памяти, отображение этих данных по требованию пользователя;
  - передача данных для работы математических моделей;
  - передача выходных параметров в экспертную систему.
- Экономический эффект при внедрении методов автоматизированной диагностики технического состояния электрооборудования достигается за счет:
- возможности планирования устранения повреждений таким образом, чтобы не нарушался режим работы энергоблока;
  - уменьшения затрат на восстановительные работы за счет раннего обнаружения наметившихся повреждений;
  - уменьшения времени и числа аварийных простоев электрооборудования.

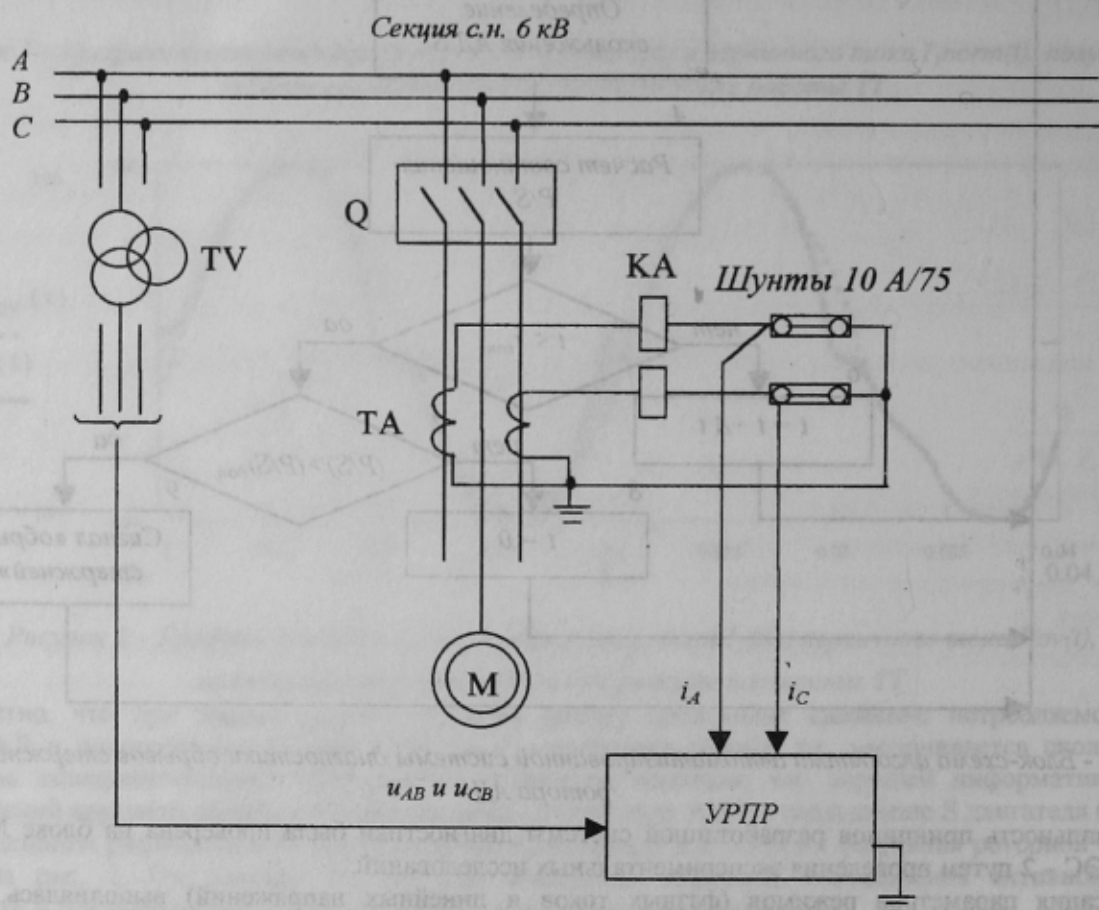


Рисунок 4 - Принципиальная схема подключения контролируемых параметров одного присоединения

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сивокобыленко В.Ф., Гребченко Н.В., Нури Абделбассет. Автоматизация диагностики стержней короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей собственных нужд электрических станций. Сборник научных трудов Донецкого государственного технического университета. Донецк, 1998, с. 6-13.
2. Майер В.А., Зения, Приемова Т.Ю. Критерии оценки несимметрии напряжении адекватно отражающий энергетический процесс трехфазных систем. - Известия вузов, Энергетика, 1990г., №9, с. 40-43.
3. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В., Нуайми Абделали. Программное восстановление первичного тока электромагнитных трансформаторов тока. Технічна електродинаміка. Спеціальний випуск. Київ - 1998, с.123-126.
4. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Определение диагностических параметров для системы диагностики повреждений роторов асинхронных двигателей. «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-99). Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 3-5 лютого 1999 року. У 3-х томах. Том 3.- Вінниця: "УНІВЕРСУМ - Вінниця", 1999, с. 243-247.
5. Надточий В.М. Экспертные системы диагностики электрооборудования. - Электричество, 1991, № 8, с. 9-16.