

УДК 621.313.333.2

Кухарчук В. В., Кривоносов В. Е., Пиротти Е. Л., Злепко С. М.

ВЛИЯНИЕ КЛАССА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Одной из концепций эксплуатации электротехнического оборудования (ЭО), в современных экономических условиях, является его обслуживание по результатам функциональной диагностики и использование методов неразрушающего контроля. Диагностические комплексы и системы выявления дефектов в ЭО на ранних стадиях позволяют отказаться от системы планово-предупредительных ремонтов. Проведенные исследования и опыт эксплуатации ЭО показал, что для исключения влияния параметров питающей сети на работу ЭО, необходим комплексный подход, в котором «электрическая сеть + ЭО» рассматриваются как единое целое. Комплексный подход к решению этой проблемы позволяет безаварийно производить включение и отключение ЭО, своевременно выявлять предаварийную ситуацию и сигнализировать о начальной стадии развития дефекта, локализовать аварийное развитие ситуации. Требованиями, предъявляемыми к методам технической диагностики и защиты электрооборудования, являются: с одной стороны - достоверность выявления дефектов, то есть, исключение ложных срабатываний устройств защит, а с другой стороны - обеспечение заданной чувствительности устройств при защите ЭО.

Для обеспечения надежности работы ЭО разработана многоуровневая система диагностики и защиты. Первый уровень защиты обеспечивает контроль линейных напряжений сети. Второй уровень защиты - контроль токов цепей. Третий уровень защиты - контроль температуры ЭО. Четвёртый уровень защиты - контроль состояния болтовых соединений, температуры окружающего воздуха и силы тока фаз. Пятый уровень защиты - контроль состояния электрической изоляции. Действие пятого уровня наступает при технологическом отключении ЭО от сети.

Оценку доверительного интервала измеренной величины тока произведена методом максимального правдоподобия с использованием точечных оценок контролируемого параметра. Промахи и систематические ошибки полученных результатов исключены, случайная ошибка имеет нормальный закон распределения.

Комплексная система управления, диагностики и защиты электрооборудования возможна при рассмотрении «питающая сеть + электрооборудование» как единое целое.

Достоверность выявления дефектов определяется классом точности приборов измерения и установочными коэффициентами чувствительности.

Ключевые слова: система диагностики и защиты, электрооборудование, доверительный интервал, диагностический параметр, болтовое соединение,

Постановка проблемы

Одной из концепций эксплуатации электротехнического оборудования (ЭО) в современных экономических условиях, на предприятиях разных отраслей, и в том числе в медицинских учреждениях, является его обслуживание по результатам выявленного дефекта. Использование методов неразрушающего контроля в системах функциональной диагностики выявления предаварийных ситуаций получают приоритетное развитие. Диагностические комплексы выявления дефектов на ранних стадиях, своевременной сигнализации и защиты ЭО позволяют отказаться от системы планово-предупредительных ремонтов и становятся

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>

економічно оправданими. Безаварійна робота сучасних технологічних виробничих комплексів, складного медичного діагностичного обладнання, в частині рентгеновських комп'ютерних томографів, во многом залежить від динамічно змінюваних режимних параметрів живлячої мережі. Проведені дослідження і досвід експлуатації ЕО [1] показали, що для виключення впливу параметрів живлячої мережі на роботу ЕО, необхідний комплексний підхід, в якому «електрична мережа + ЕО» розглядаються як єдине ціле. Комплексний підхід до рішення цієї проблеми дозволяє безаварійно виробляти включення і відключення ЕО, своєчасно виявляти предаварійну ситуацію і сигналізувати про початковий етап розвитку дефекту, локалізувати аварійне розвиток ситуації. Контроль змін інформаційних параметрів в системах діагностики і захисту ЕО передбачає застосування контрольних-вимірних технічних засобів. Процес вимірювання і одержання достовірних діагностичних результатів є одним з найважливіших умов роботи таких систем, а вимірювання є зв'язуючим ланкою, забезпечуючим безпечну і безаварійну роботу промислових і енергетичних агрегатів, оптимізацію протікаючих в них процесів. Висока і гарантована точність одержаних результатів вимірювань забезпечує задану чутливість і правильність приймаваних рішень на всіх рівнях управління, діагностики і захисту ЕО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вимогами, пред'являються до методів технічної діагностики і захисту електрообладнання, є: з однієї сторони - достовірність виявлення дефектів, то єсть, виключення ложних спрацьовувань, а з іншої сторони - забезпечення заданої чутливості пристроїв при захисті ЕО.

Забезпечення достовірності виявлення дефекту з заданою надійністю дозволяє проводити оцінку і встановлення меж довірливих інтервалів вимірюваних параметрів. В роботі [2] розглянута нова технологія проектування сучасної інформаційно-вимірної системи центру управління мереж електричної компанії на основі застосування базисних структур і їх компонентів, а також сучасні методи, засоби діагностики і контролю електрообладнання підстанцій. В роботі [3] наведено комплексна система діагностики електродвигачів. В книзі [4] розглянута методологія проектування сучасної цифрової підстанції єдиної електричної мережі в формі вектора технічних вимог; обладнання інформаційного взаємодіяння; засобів контролю, управління, захисту і вимірювань; інформаційних і керуючих систем. Відомо технічне пристрій [5], в якому одночасно контролюють величини декількох параметрів, встановлюють черговість вимірювання контролюваних величин, встановлюють межі відхилення виміряних величин, порівнюють одержані значення з заданими відхиленнями і при відхиленні виміряної величини від заданого граничного значення відключають МО від мережі. Однак, в відомих технічних роботах недостатньо досліджено вплив класу точності на чутливість засобів захисту ЕО і одержання достовірного діагностичного результату, що регламентовано в документі [6].

Ціль дослідження

Розробка багаторівневої системи управління, діагностики і захисту електрообладнання.

Оцінка класу точності засобів вимірювання на величину довірливих інтервалів, контролюваних при косвенних вимірюваннях, і керуючих параметрів в багаторівневої системі діагностики і захисту електрообладнання.

Изложение основного материала

Традиционная схема подключения ЭО к питающей приведена на рис. 1.

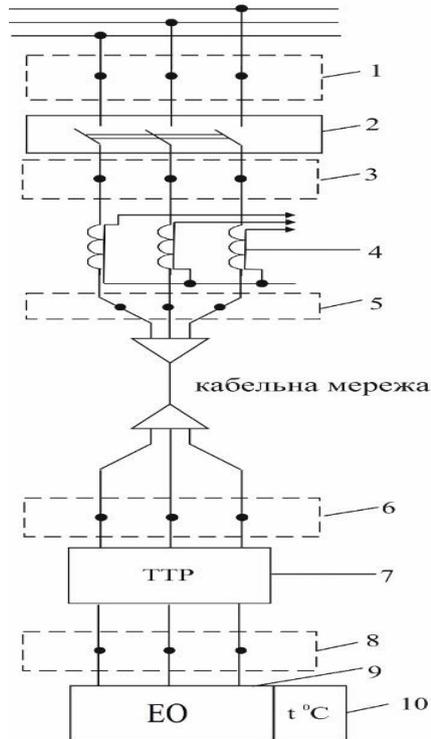


Рисунок 1 – Схема подключения электрооборудования к сети

На рис. 1 обозначено: узловые соединения с установленными датчиками температур болтовых соединений - 1, 3, 5, 6, и 8, коммутационный блок - 2, блок измерения силы фазных токов - 4, твердотельные реле ТТР - 7, ЕО- 9, датчики измерения температур ЭО – 10.

С помощью коммутационного аппарата (КА) оператор (врач, диспетчер) с пульта управления подаётся питание на ЭО. Оператор во время включения КА для подачи питания на ЭО не контролирует техническое состояние целостность токовых цепей, болтовых соединений, состояние изоляции ЭО и кабельной линий, Возможные аварийные режимы в питающей сети, уровни отклонений величин напряжений сети. Неполнофазные режимы в сети, отклонения величин напряжения от номинального значения, являются причиной возникновения внутренних поломок ЭО. При работе ЭО важно обеспечить согласование всех видов защиты ЭО и режимных изменений в энергосистеме с целью выявления начального момента возникновения аварийной ситуации и предотвращения ее развития.

Для обеспечения надежности работы ЭО разработана многоуровневая система диагностики и защиты ЭО (МСДиЗЭО) и ее отдельных элементов [7,8,9] На рис.2 приведена функциональная схема (МСДиЗЭО), показывающая очередности работы уровней защиты и их зоны действия.

Енергетичні системи та обладнання

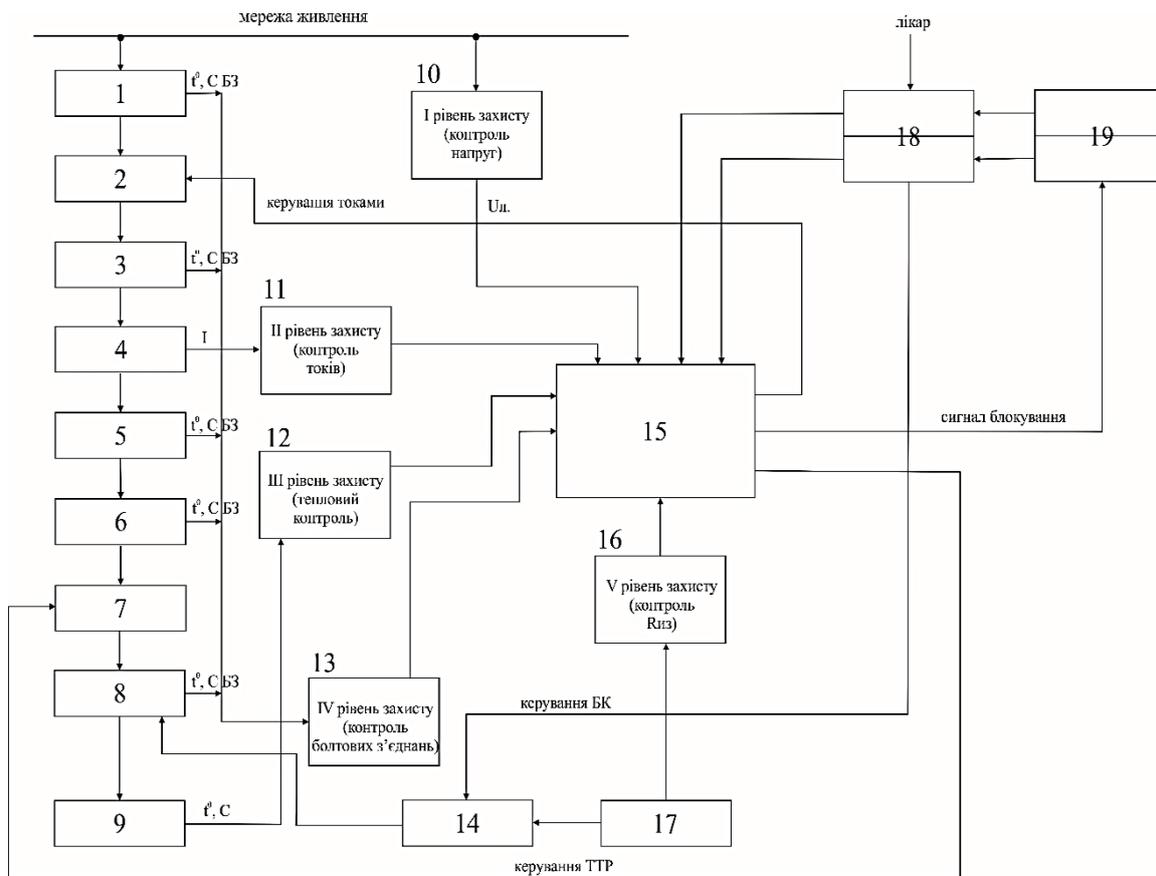


Рисунок 2 – Функціональна схема багатоуровневої системи діагностики і захисту електрообладнання

На рис. 2 обозначено: 1 - узловое болтовое соединение с датчиками контроля температуры, 2 - коммутационный аппарат, 3 - узловое болтовое соединение с датчиками контроля температуры, 4 - контроль силы токов фаз, 5 - узловое болтовое соединение с датчиками контроля температуры, 6 - узловое болтовое соединение с датчиками контроля температуры, 7 - твердотельные реле, 8 - узловое болтовое соединение с датчиками контроля температуры, 9 - медицинское оборудование с контролем температуры, 10 - первый уровень защиты, 11 - второй уровень защиты, 12 - третий уровень защиты, 13 - четвертый уровень защиты, 14 - блок переключения батарей конденсаторов, 15 - микроконтроллер и управление, 16-пятый уровень защиты, 17 - контроль скорости разряда батареи конденсаторов, 18 - управление «Пуск» и «стоп», 19 - управление «блокировка» и «снятие блокировки».

Первый уровень защиты – обеспечивает контроль линейных напряжений сети.

Второй уровень защиты - обеспечивает контроль токов цепей и состояния болтовых токоведущих соединений.

Третий уровень защиты - обеспечивает контроль температуры ЭО.

Четвертый уровень защиты - обеспечивает контроль состояния болтовых соединений, температуры окружающего воздуха и силы тока фаз.

Пятый уровень защиты – обеспечивает контроль состояния электрической изоляции. Действие пятого уровня наступает при технологическом отключении ЭО от сети.

На рис. 3 представлена блок схема устройства многоуровневой системы управления, диагностики и защиты электрооборудования.

Енергетичні системи та обладнання

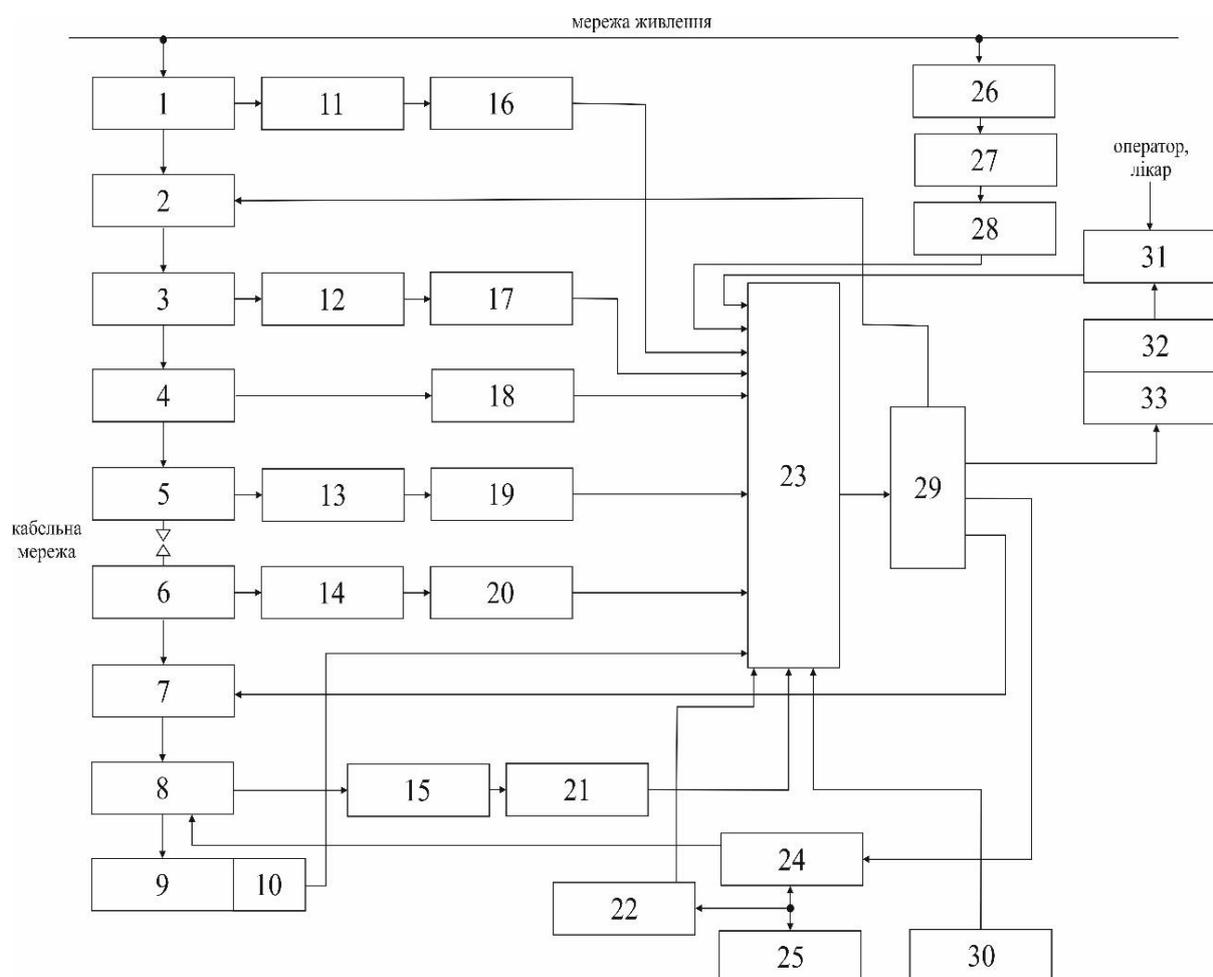


Рисунок 3 – Блок схема многоуровневой системы управления, диагностики и защиты электрооборудования

На рис. 3 обозначено: узловое болтовое соединение с датчиками контроля температуры – 1,3,5,6,8, коммутационный аппарат – 2, контроль силы токов фаз – 4, твердотельные реле – 7, электропотребитель – с контролем температуры – 10, измерители температуры – 11,12,13,14,15, аналогово цифровые преобразователи – 16,17,18,19,20,21, блок измерения изоляции – 22, микропроцессор – 23, блок коммутации батарей конденсаторов – 25, блоки измерения линейных напряжения, выделения первой гармонической составляющей и аналоговым цифровым преобразованием – 26,27,28, блок коммутаций – 29, блок измерения температуры воздуха – 30, блок управления кнопки «Пуск» и «Стоп» – 31, блоки блокировки и снятия блокировки 31 и 32.

Измерительные средства величин тока, напряжения, температур имеют класс точности измерения, что влияет на отклонение измеренного параметра от истинного значения. Разброс значений измеренных параметров влияет на размах доверительных интервалов, что в свою очередь, может привести к ошибочному выявлению дефекта.

Оценим влияние класса точности измерительных датчиков для выявления начального момента ослабления болтового токоведущего соединения для диагностики состояния болтовых токоведущих соединений устройств [9,10] и узлов 1,3,5,6,8, устройства рис. 3.

Определение начального момента ослабления БТС является выполнения неравенства:
 $T_{бс.} > T_{кр.}$

Енергетичні системи та обладнання

1. Контактно вимірюють температуру болтового з'єднання – $T_{\text{бс}}$.
 2. Вимірюють ток, протікаючий в цьому болтовому з'єднанні, і визначають розрахункове значення температури исправного болтового з'єднання – $T_{\text{ис}}$.
 3. Вимірюють температуру оточуючого повітря – $T_{\text{ов}}$.
 4. Визначають $T_{\text{кр}}$ – корективоване розрахункове значення температурного болтового з'єднання з урахування зміни температури оточуючого повітря $T_{\text{ов}}$.
 5. Неперервно порівнюють значення температур $T_{\text{кр}}$ і $T_{\text{бс}}$. По перевищенню температури болтового з'єднання розрахункового значення судять про збільшення переходного опору болтового з'єднання, що є критерієм визначення початкового моменту розвитку аварійної ситуації.
 6. Достиження температури болтового з'єднання критичної температури, наприклад, 100°C , є критерієм відключення обладнання від мережі.
- Вираз (1) показує функціональну залежність температури болтового з'єднання від струму навантаження, температури оточуючого повітря, величини переходного опору і температури, викликані первинним нагрівом:

$$T_{\text{бс}} = f(I_{\text{нагр}}^2, (R_{\text{бс}} + R_{\text{пр}}), (T_{\text{нач}}), (T_{\text{ов}} - 24^{\circ}\text{C})). \quad (1)$$

Умовою нормального стану болтового з'єднання є множина оцінок, визначена виразом:

$$\Phi_1 = \{T_{\text{бс}} \pm \Delta(T_{\text{бс}})\} \subset \{T_{\text{кр}} \pm \Delta(T_{\text{кр}})\} \quad (2)$$

Умовою визначення початкового моменту ослаблення болтового з'єднання є множина:

$$\Phi_2 = \{T_{\text{бс}} \pm \Delta(T_{\text{бс}})\} \setminus \{T_{\text{кр}} \pm \Delta(T_{\text{кр}})\} \quad (3)$$

де \setminus - символ відносного доповнення.

Оцінку довірливого інтервалу виміряної величини струму зробимо методом максимального правдоподібності з використанням точкових оцінок контролюваного параметра [7, 8]. Рахуємо промахи і систематичні помилки отриманих результатів виключеними, а випадкова помилка визначиться як:

$$\Delta = X - X_0 \quad (4)$$

де X_0 – справжнє значення виміряної величини,

X - результат вимірювань.

Відповідно до теореми Ляпунова (основна гіпотеза) випадкова помилка розподіляється за випадковим законом, математичне сподівання випадкової помилки Δ дорівнює нулю і її густина ймовірності $f(\Delta)$ і функція розподілу $F(\Delta)$ мають вигляд [14]:

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}; F(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt. \quad (5)$$

Параметр розподілу, середньоквадратичне відхилення σ випадкової величини Δ , приймаємо як середню помилку.

Ймовірність помилки Δ лежачої в інтервалі $(-\alpha, +\alpha)$ виражається через інтеграл ймовірності наступним чином:

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

Енергетичні системи та обладнання

$$p(-\alpha < \Delta < +\alpha) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\alpha}^{+\alpha} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta = \psi(k), \quad (6)$$

где $k = \frac{\alpha}{\sigma}$.

Вычислим значение $k = \frac{\alpha}{\sigma}$. Для заданного α при известном σ , определяют вероятность по табличным данным для функции Лапласа $\Phi(k)$, причем $\Phi(k) = \frac{1}{2} \psi(k)$. Если исходной является вероятность ошибки, $\psi(k)$, то обратным интерполированием для $\Phi(k)$ определяется значение k , а значит интервал ошибки Δ .

Выражение для доверительных вероятностей имеет вид:

$$p(-k\sigma < x_i - x_0 < k\sigma) = \psi(k). \quad (7)$$

При ограниченном количестве наблюдений вариационный ряд из n наблюдений величин x_1, x_2, \dots, x_i можно рассматривать как случайную выборку из генеральной совокупности. Поскольку наблюдения взаимно независимы, то плотность вероятности для выборки X_1, X_2, \dots, X_i определяется как произведение плотности вероятностей каждого из наблюдений, т. е.:

$$p(x_1, x_2, \dots, x_i) = p(x_1)p(x_2) \dots p(x_i) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-n} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2\right]. \quad (8)$$

Наибольшего значения вероятность выборки достигается при:

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_{cp} \quad (9)$$

и любом значении σ , а также при $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 = \sigma_n$, и любом x_0 .

Таким образом при нормальном распределении наиболее вероятностной оценкой наблюдаемой величины является среднее выборки x_{cp} , а наилучшей оценкой средней ошибки для данного x_0 является среднеквадратичное отклонение σ_n от истинного значения наблюдаемой величины [10]. Точечная оценка σ_n используется, когда известно истинное значение x_0 :

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta^2}. \quad (10)$$

В классической теории ошибок для оценки точности наблюдения необходимо рассматривать $x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ и $\sigma_{cp} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}$ как случайные величины. Точность оценки величины x_0 повышается пропорционально квадратному корню из объема выборки. На практике ограничиваются 30-50 отсчетами [11].

Точное значение σ , как правило, неизвестно, поэтому используют величину S-выборочного стандарта, которая определяется по формуле Бесселя:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}. \quad (11)$$

Енергетичні системи та обладнання

$$S_{\text{ср}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}. \quad (12)$$

Тогда, достоверность определения величины x_0 по n наблюдениям выражается как:

$$p(-k S_{\text{ср}} < x_{\text{ср}} - x_0 < k S_{\text{ср}}) = \psi(k),$$

либо сокращенно $x_0 = x_{\text{ср}} \pm k S_{\text{ср}}$.

Обозначим полученные величины, определяющие границы доверительных интервалов измеряемых величин, следующим образом: температура болтового соединения - $Y_{T_{\text{бс}}} = k_{T_{\text{бс}}} S_{\text{ср}_{\text{бс}}}$, измеренная величина температуры окружающего воздуха - $Y_{T_{\text{ов}}} = k_{T_{\text{ов}}} S_{\text{ср}_{\text{ов}}}$, измеренная величина тока нагрузки $Y_{I_{\text{н}}} = k_{I_{\text{н}}} S_{\text{ср}_{I_{\text{н}}}}$. Условием перехода из множества значений (1) во множество, определяющее момент начала ослабления болтового соединения (2), с вероятностью $p(T_{\text{кт}}) = 1$, является выполнения неравенства:

$$T_{\text{убс}} \pm Y_{T_{\text{бс}}} \geq \left(\frac{(1+k_{\text{ч}}(Y_{I_{\text{н}}}))^2}{\alpha F} (R_{\text{бс}} + R_{\text{пр}}) + 24^{\circ}\text{C} \right) + ((T_{\text{нс}} + Y_{T_{\text{нс}}}) - 24^{\circ}\text{C}), \quad (13)$$

где $k_{\text{ч}}$ – коэффициент, расширяющий границы множества допустимых значений, включающего результаты измерения температуры болтового соединения.

Коэффициент $k_{\text{ч}}$ - позволяет определить и задать чувствительность метода для определения перехода значений измеренной температуры болтового соединения из нечеткого множества в четкое множество, а именно перехода из состояния «0» в состояния «1» при булевой оценке состояния объекта.

Для оценки зависимости температуры болтового соединения от температуры окружающего воздуха при различных значениях токов нагрузки произведено натурное моделирование. Объектом исследования является болтового соединения латунных шин, имеющих размер 6x50x2 мм, соединенных болтами М5. В качестве источника электроэнергии использован генератор переменного тока ПСМ АД 50, позволяющий получать трёхфазное напряжение 0,4 кВ, ток регулируется в пределах (10 ÷ 100) А. В качестве измерителя силы тока использован трансформатор тока ТТ 100/5 напряжением 0,4 кВ и амперметр, класс точности прибора 0,2. Для измерения температур болтового соединения и температуры окружающего воздуха используем датчик температур с встроенным АЦП, тип АТ30ТSE752, 9- to 12-bit Selectable, Accurate Digital Temperature Sensor with Nonvolatile Registers and Serial EEPROM. Диапазон измерения температур (-55°C ÷ +125°C). Абсолютная максимальная погрешность измерения температуры в заданном диапазоне составляет $\Delta = \pm 2,0^{\circ}\text{C}$. Данный датчик обеспечивает измерения температуры с шагом дискретизации $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Результаты измерения температуры болтового соединения для определения доверительных интервалов приведены в табл. 1. Для вычисления $T_{\text{ср}}$ и S используем формулы преобразованные имеющие вид:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - a) + a, \quad (14)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left\{ \sum_{i=1}^n (T_i - a)^2 - \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n (T_i - a)]^2 \right\}} \quad (15)$$

где a - произвольная величина, принимаемая здесь равной 50°C

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

Таблица 1 – Результаты измерения температуры болтового соединения

№	$T_i, ^\circ\text{C}$	$(T_i - a)$	$(T_i - a)^2$	№	$T_i, ^\circ\text{C}$	$(T_i - a)$	$(T_i - a)^2$
1	49,4	-0,6	0,36	16	48,9	-1,1	1,21
2	51,8	1,8	3,24	17	49,6	-0,4	0,16
3	49,1	-0,9	0,81	18	49,4	-0,6	0,36
4	49,4	-0,6	0,36	19	48,9	-0,1	0,01
5	49,5	-0,5	0,25	20	50,1	0,1	0,01
6	50,1	0,1	0,01	21	50,2	0,2	0,04
7	50,2	0,2	0,04	22	49,9	-0,1	0,01
8	49,0	-1,0	1,0	23	49,7	-0,3	0,09
9	50,6	0,6	0,36	24	48,8	-1,2	1,21
10	48,9	-1,1	1,21	25	50,1	0,1	0,01
11	49,7	-0,3	0,09	26	50,4	0,4	0,16
12	49,9	-0,1	0,01	27	50,7	0,7	0,49
13	50,7	0,7	0,49	28	49,9	-0,1	0,01
14	50,3	0,3	0,09	29	50,2	0,2	0,04
15	50,4	0,4	0,16	30	50,4	0,4	0,16
				Σ		-2,8	12,45

Таким образом,

$$T_{\text{cp}} = \frac{-2,8}{30} + 50 = 49,9^\circ\text{C},$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{29} \left(12,45 - \frac{-2,8^2}{30} \right)} = 0,84, \quad S_{\text{cp}} = \frac{0,84}{\sqrt{30}} = 0,15.$$

Температура болтового соединения находится в интервале $T_{\text{бс}} = (49,9 \mp 0,12)^\circ\text{C}$ с вероятностью 0,683, а с вероятностью (0,99) - $T_{\text{бс}} = (49,9 \mp 0,38)^\circ\text{C}$.

В табл. 2 приведены результаты измерения тока для расчета доверительных интервалов.

Здесь, a принимаем равным 70 А. Тогда:

$$I = \frac{-0,9}{30} + 70 = 69,97 \text{ А}, \quad S=0,145, \quad S_{\text{cp}}=0,026.$$

Величина тока находится в интервале $I=(69,97 \mp 0,03)$ с вероятностью 0,683, и $I=(69,97 \mp 0,12)$ с вероятностью (0,999).

Величина тока для расчета температуры исправного болтового соединения будет:

$$I_{\text{расч}} = I + k_{\text{ч}}(Y_{I_n}) = 69,97 + 1,2(0,12) = 70,114 \text{ А}.$$

Расчетная температура болтового соединения в этом случае:

$$T_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{расч}}^2 R_{\text{бз}}}{\alpha F} = \frac{70,114^2 \cdot 27,4 \times 10^{-5}}{85,5 \cdot 6 \times 10^{-4}} + 24^\circ\text{C} = 50,425^\circ\text{C},$$

Енергетичні системи та обладнання

где $\alpha=85,5 \left(\frac{\text{BT}}{\text{M}^2\text{°C}} \right)$ -- коэффициент теплопередачи для латуни.

Таблица 2 – Результаты измерения тока

№	$I_i, \text{°C}$	$(I_i - a)$	$(I_i - a)^2$	№	$I, \text{°C}$	$(I_i - a)$	$(I_i - a)^2$
1	69,8	-0,2	0,04	16	69,9	-0,1	0,01
2	71,1	1,1	1,21	17	69,6	-0,4	0,16
3	69,1	-0,9	0,81	18	70,4	0,4	0,16
4	69,4	-0,6	0,36	19	69,9	-0,1	0,01
5	69,5	-0,5	0,25	20	70,1	0,1	0,01
6	70,1	0,1	0,01	21	68,9	-2,1	4,41
7	70,4	0,4	0,16	22	69,9	-0,1	0,01
8	69,9	-0,1	0,01	23	69,7	-0,3	0,09
9	70,7	0,7	0,49	24	70,8	0,8	0,64
10	69,9	-0,1	0,01	25	70,3	0,3	0,09
11	70,7	-0,3	0,09	26	70,4	0,4	0,16
12	71,0	-0,1	0,01	27	70,2	0,2	0,04
13	69,7	-0,3	0,49	28	69,9	-0,1	0,01
14	70,6	0,4	0,09	29	70,7	0,7	0,49
15	70,6	0,6	0,16	30	70,2	0,4	0,16
				Σ		-0,9	10,64

$$T_{\text{расч}} = 50,425\text{°C} > T_{\text{бс}} = (49,9 \mp 0,38)\text{°C}.$$

Повышение точности измерения силы тока увеличивает чувствительность метода, но снижает его надежность. Для повышения достоверности определения начального момента необходимо уменьшить класс точности измерения тока. Наибольшая абсолютная погрешность для класса точности $K=4$ и предела измерения $I=100\text{A}$ определится по формуле:

$$\Delta_I = \frac{KI}{100} = \frac{4 \times 100}{100} = 4\text{A}$$

Расчетная величина температуры болтового сопротивления будет равна:

$$\begin{aligned} I_{\text{расч}} &= I + k_{\text{ч}}(Y_{I_{\text{н}}}) = 69,97 + 1,2(4) = 74,5 \text{ A}; \\ T_{\text{расч}} &= \frac{I_{\text{расч}}^2 R_{\text{бс}}}{\alpha F} = \frac{74,5^2 \cdot 27,4 \times 10^{-5}}{85,5 \cdot 6 \times 10^{-4}} + 24\text{°C} = 53,84\text{°C}; \\ T_{\text{расч}} &= 53,85\text{°C} > T_{\text{бс}} = (49,9 \mp 0,38)\text{°C}. \end{aligned}$$

Чувствительность снизилась с 0,3 % до 7,1. %, это значит, что при ослаблении болтового соединения на 7 % и выше произойдет определение начального момента.

Функция преобразования средства моделирования температурного перегрузки ЭО от допустимого слоя пыли на поверхности изоляции и тока нагрузки имеет вид;

$$T_{\text{мо}} = f(T_{\text{дат 1}}, T_{\text{дат 2}}, h_{\text{доп}}, I_{\text{н}}). \quad (16)$$

Диагностирования токовой перегрузки осуществляется с помощью контроля температур двух датчиков температуры, фирмы National Semiconductor LM 75-33, и имеют параметры: предел измерений $-55\text{°C} - +150\text{°C}$, точность измерения, $\pm 1,5\text{°C}$, разрешения измерения $0,5\text{°C}$. Так как

Режим доступа: <http://sap.pstu.edu>

Енергетичні системи та обладнання

получение информации является результатом прямых измерений, то границы доверительных интервалов при определении критической температуры определяются как:

$$T_{кр} = (90 \pm 1,5)^\circ\text{C}; P=0,95.$$

Оценка доверительных интервалов толщины слоя пылевого покрытие, которое определяется выражением $h = \lambda (T_{yc2} - T_{yc1})$, осуществлена при косвенном измерения температур двух датчиков. Формула для вычисления относительной погрешности толщины пыли имеет вид:

$$\Delta h = \pm \frac{1}{\lambda S_{п.д}(T_{yc2} - T_{yc1})B} \times \sqrt{\left(\frac{d(\lambda S_{п.д}(T_{yc2} - T_{yc1}) B)}{dT_{yc2}} \Delta T_{yc2}\right)^2 + \left(\frac{d(\lambda S_{п.д}(T_{yc2} - T_{yc1}) B)}{dT_{yc1}} \Delta T_{yc1}\right)^2}$$

где - ΔT_{yc1} и ΔT_{yc2} абсолютная погрешность датчиков температуры;

$$B = \frac{1}{I_{раб}^2 R k_I}$$

Относительная погрешность будет равна:

$$\Delta h = \frac{\Delta T_{yc2} + \Delta T_{yc1}}{T_{yc2} + T_{yc1}} = 0,024 = 2,4 \%$$

Абсолютная погрешность измеренной толщины слоя пыли при максимальном значении 5 см составит:

$$\Delta h_{абс} = \mp 5 \cdot 0,024 = \mp 0,12 \text{ см.}$$

Для номинальной токовой нагрузки и коэффициент $\lambda = 0,22 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C})$, зона доверительных интервалов при определении толщины пылевого покрытия определится как:

$$h = (1.10 \pm 0,12) \text{ см}; P=0,95.$$

ВЫВОДЫ

Комплексная система управления, диагностики и защиты электрооборудования возможна при рассмотрении «питающая сеть + электрооборудование» как единое целое.

Достоверность выявления дефектов определяется классом точности приборов измерения и установочными коэффициентами чувствительности.

Список использованных источников:

1. *Кривоносов, В. Е.* Скоростная характеристика фронта напряжения как информационного параметра в системах диагностики и защиты рентгеновского компьютерного томографа / *В. Е. Кривоносов, С. М. Зленко, С. В. Павлов* // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2017. – Вип. 35. – С. 146–156. – (Серія : Технічні науки)

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

Енергетичні системи та обладнання

2. Чичёв, С. И. Информационно-измерительная система электросетевой компании / С. И. Чичёв, В. Ф. Калинин, Е. И. Глинкин. – М. : Спектр, 2011. – 156 с.
3. Хомутов, С. О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и технологии восстановления изоляции / С. О. Хомутов.. – Барнаул : МП ЭОР», 2015.-220с.
4. Чичёв, С. И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / С. И. Чичёв, В. Ф. Калинин, Е. И. Глинкин. – М. : Спектр, 2014. – 228 с.
5. Пат. 2263382 Российская Федерация, МПК H02H 3/38. Способ защиты потребителей энергии сети переменного тока от аварийных режимов работы и устройство для его осуществления.
6. Технічний регламент засобів вимірювальної техніки [Електронний ресурс] : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 24 лютого 2016 р. № 163. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/163-2016-%D0%BF>
7. Пат. 118399 Україна, МПК H02H5/04. Пристрій захисту рентгенівського комп'ютерного томографа (РКТ) / Кривонос В. Є., Зленко С. М., Азархов О. Ю., Коваль Л. Г. – № а201703752, опубл. 10.01.2019, Бюл. № 16. – 4 с.
8. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера / В. П. Сигорский. – Київ : Техніка, 1975. – 786 с.

Кухарчук В. В., Кривонос В. Є., Піротгі Е. Л., Зленко С. М.

ВПЛИВ КЛАСУ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ НА ДОСТОВІРНІСТЬ ДІАГНОСТИКИ І ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Однією з концепцій експлуатації електротехнічного обладнання (ЕО), в сучасних економічних умовах, є його обслуговування за результатами функціональної діагностики і використання методів неруйнівного контролю. Діагностичні комплекси і системи виявлення дефектів в ЕО на ранніх стадіях дозволяють відмовитися від системи планово-попереджувальних ремонтів. Проведені дослідження і досвід експлуатації ЕО] показав, що для виключення впливу параметрів мережі живлення на роботу ЕО, необхідний комплексний підхід, в якому «електрична мережа + ЕО» розглядаються як єдине ціле. Комплексний підхід до вирішення цієї проблеми дозволяє безаварійно робити включення і відключення ЕО, своєчасно виявляти передаварійну ситуацію і сигналізувати про початкову стадію розвитку дефекту, локалізувати аварійний розвиток ситуації. Вимогами, що пред'являються до методів технічної діагностики та захисту електрообладнання, є: з одного боку достовірність виявлення дефектів, тобто, виключення помилкових спрацьовувань пристроїв захистів, а з іншого боку забезпечення заданої чутливості пристроїв при захисті ЕО.

Для забезпечення надійності роботи ЕО розроблена багаторівнева система діагностики і захисту. Перший рівень захисту забезпечує контроль лінійних напруг мережі. Другий рівень захисту - контроль струмів ланцюгів. Третій рівень захисту - контроль температури ЕО. Четвертий рівень захисту контроль стану болтових з'єднань, температури навколишнього повітря і сили струму фаз. П'ятий рівень захисту - контроль стану електричної ізоляції. Дія п'ятого рівня настає при технологічному відключенні ЕО від мережі.

Оцінку довірчого інтервалу вимірюваної величини струму проведена методом максимальної правдоподібності з використанням точкових оцінок контрольованого

Енергетичні системи та обладнання

параметра. Промахи і систематичні помилки отриманих результатів виключені, випадкова помилка має нормальний закон розподілу.

Комплексна система управління, діагностики та захисту електрообладнання можлива при розгляді «живить мережу + електрообладнання» як єдине ціле.

Достовірність виявлення дефектів визначається класом точності приладів вимірювання та установочними коефіцієнтами чутливості.

Ключові слова: система діагностики і захисту, електрообладнання, довірчий інтервал, діагностичний параметр.

Kukharchuk V.V., Krivonosov V.E., Pirotti E.L., Zlepko S.M.

THE IMPACT OF THE ACCURACY CLASS OF MEASURING INSTRUMENTS ON THE ACCURACY OF DIAGNOSTICS AND PROTECTION OF ELECTRICAL EQUIPMENT

One of the concepts of operation of electrical equipment (EO), in modern economic conditions, is its maintenance based on the results of functional diagnostics and the use of non-destructive testing methods. Diagnostic systems and systems for detecting defects in EO in the early stages make it possible to abandon the system of preventive maintenance. Conducted research and experience of operating the EO] showed that in order to eliminate the influence of the parameters of the power supply network on the operation of the EO, an integrated approach is needed in which the «electrical network + EO» is considered as a whole. An integrated approach to solving this problem allows fail-safe switching on and off of EO, timely detecting a pre-emergency situation and signaling the initial stage of defect development, localizing emergency development of the situation. The requirements for methods of technical diagnostics and protection of electrical equipment are: on the one hand, the reliability of detection of defects, that is, the elimination of false alarms of protection devices, and on the other hand, the provision of a given sensitivity of devices when protecting EA.

To ensure the reliability of the EA, a multi-level diagnostic and protection system has been developed. The first level of protection provides control of the line voltage of the network. The second level of protection is the control of circuit currents. The third level of protection is the control of the EO temperature. The fourth level of protection is monitoring the state of bolted joints, ambient temperature and the current strength of the phases. The fifth level of protection is monitoring the state of electrical insulation. The action of the fifth level occurs when technological EO disconnection from the network.

The estimation of the confidence interval of the measured current value was made by the maximum likelihood method using point estimates of the monitored parameter. Misses and systematic errors of the results obtained are excluded; a random error has a normal distribution law.

Integrated control system, diagnostics and protection of electrical equipment is possible when considering the «mains + electrical equipment» as a whole.

The reliability of the detection of defects is determined by the accuracy class of measuring devices and installation sensitivity coefficients.

Keywords: diagnostic and protection system, electrical equipment, confidence interval, diagnostic parameter.

Рецензент

Статья принята 03.03.2019 г.