

УДК 621.313.333.2

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.157865

ДИАГНОСТИКА ПРЕДАВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ БОЛТОВОГО ТОКОВЕДУЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Кривоносов В. Е.

1. Введение

В системе передачи электроэнергии соединения электрической цепи электроснабжения предприятий в 40 % случаев осуществляются с помощью болтовых соединений. Проведенные исследования причин остановки электрооборудования (ЭО) на ряде предприятий черной металлургии, горно-перерабатывающих комплексов, в медицинских учреждениях показали, что в 1,5–2 % случаев причиной аварийной остановки ЭО является ослабление болтового токоведущего соединения (БТС) [1, 2].

Основная проблема БТС – это механическое ослабление плотности прилегающих поверхностей токоведущих шин, кабельных наконечников, присоединений коммутационной аппаратуры и т. д. Механическое ослабление приводит к увеличению переходного сопротивления контакта в месте болтового соединения даже при протекании по нему допустимого тока нагрузки, что является причиной перегрева БТС. Перегрев БТС является одной из причин возникновения коротких замыканий в распределительных щитах и образования очагов пожара [3]. Выявление начального момента ослабления БТС позволяет своевременно провести профилактические работы и избежать аварийных ситуаций.

Поэтому актуальным является разработка методов диагностики состояния БТС, работающих в условиях динамично изменяющихся режимов токовой нагрузки и температуры окружающего БТС воздуха.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются методы неразрушающего контроля состояния болтового токоведущего соединения в условиях динамически изменяющихся режимов токовой нагрузки и температуры окружающего воздуха.

На появления градиента температур в месте болтового соединения оказывают влияние изменение климатических параметров, в диапазоне от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и динамические изменения режимов эксплуатационных токовых нагрузок. Динамическое изменение тока в пределах $(0,1-1,1) \cdot I_n$, где I_n – номинальный ток нагрузки, связано с технологическим режимом, а кратковременное изменение токов до $(5-7) \cdot I_n$ – с пусковыми режимами. Постоянно действующие электродинамические силы в БТС с частотой 100 Гц, возникающие при протекании тока в соседних проводах, и динамические отклонения напряжений сети в пределах $\pm 10\% \cdot U_n$ вызывают дополнительные изменения тока, протекающего в БТС. Перечисленные факторы, действующие на БТС, являются причиной их ослабления [4]. И данные факторы недостаточно изучены в настоящее время.

3. Цель и задачи исследования

Цель работы – исследование влияния случайно изменяющихся уровней напряжений на величины токов нагрузки и температурные изменения БТС.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Усовершенствовать тепловой метод неразрушающего контроля состояния БТС для своевременного выявления предаварийной ситуации при нестационарных и случайных режимах изменения тока, протекающего в БТС.

2. Разработать критерии выявления предаварийной ситуации БТС в условиях нестационарного и случайного режимов изменения тока.

4. Исследование существующих решений проблемы

Для диагностики состояния БТС широко используется тепловой метод неразрушающего контроля [5], как контактным способом, так и без контактным, что позволяет выявлять аварийное состояние БТС, не нарушая технологического процесса.

К известным методам диагностики состояния БТС относятся такие, как:

– установка плавких меток с легкоплавким припоем (сплавом Розе) и контактное измерение температуры [6];

– тепловизорный контроль [7];

– использование цветочувствительных наклеиваемых индикаторов;

– установка биметаллических пластин под гайку БТС и др.

А к известным устройствам диагностики состояния БТС относятся такие, в которых:

– контролируют температуру БТС [8, 9]

– производят контроль тока нагрузки и температуры БТС [10].

Данные методы реагируют на аварийное состояние ослабленного болтового соединения, то есть на температуру БТС, превышающую критическое значение. Контроль только температуры БТС не позволяет диагностировать начальный момент ослабления БТС, то есть выявить предаварийную ситуацию.

Среди основных направлений решения проблемы диагностики состояния БТС могут быть выделены [3, 4], в которых использован тепловизионный метод измерения температуры БТС. Данные методы контроля целостности БТС носят эпизодический характер и используются в качестве дополнительной диагностики состояния БТС при проведении плановых осмотров ЭО.

Работы же [5, 6] посвящены контактному измерению температуры БТС. В данных методах достижение температуры БТС критического значения является критерием определения аварийного состояния БТС и отключения ЭО от сети. В данных решениях не выявляется начальный момент ослабления БТС. В работе [7] проведен анализ использования инфракрасного излучения для контроля состояния ЭО. Однако, в этой работе не до конца раскрыто использование явления для диагностики БТС.

Авторами работ [8, 9] показано, что использование контактного метода контроля состояния БТС является наиболее перспективным, но остается вопрос выявления начального момента ослабления БТС при изменениях тока нагрузки, режимов питающего напряжения и температуры окружающего БТС воздуха. Альтернативный

вариант решения проблемы, изложенный в работе [10], предусматривает проведение одновременного контроля тока нагрузки и температуры окружающего воздуха при стационарном режиме токовой нагрузки.

Автор работы [11, 12] подчеркивает важность одновременного контроля температуры БТС, температуры окружающего воздуха и тока нагрузки. В этих исследованиях усовершенствован тепловой метод неразрушающего контроля, однако, метод работает только при стационарных режимах изменения тока и температуры воздуха.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что для повышения достоверности диагностики предаварийной ситуации, а именно, выявления начального момента ослабления БТС, необходимо учитывать динамические изменения тока нагрузки и температуры окружающего БТС воздуха.

5. Методы исследования

Процесс механического ослабления БТС при отсутствии внешних климатических, вибрационных факторов и при стационарном характере токовой нагрузки, не превышающей $0,5I_{н}$, протекает от нескольких суток до нескольких месяцев. Возрастание тока нагрузки и температуры окружающего воздуха приводит к перегреву ослабленного БТС выше критической температуры за 0,5–1 часа. Поэтому осуществление эпизодического контроля только температуры БТС не достаточно для выявления момента определения ослабления БТС. Для выявления предаварийной ситуации ослабления БТС согласно [11, 12] дополнительно производят контроль величины тока нагрузки и динамически изменяющихся параметров окружающего БТС воздуха. Контроль дополнительных величин позволяет выявить начальный момент ослабления БТС. Однако, в этих технических решениях [11, 12] выявление предаварийной ситуации ослабления БТС рассмотрено для стационарных режимов токовой нагрузки, напряжений питающей сети и температуры воздуха. Условием определения начального момента ослабления БТС в устройствах [11, 12] является неравенство:

$$T_{из} > T_{рсл}, \quad (1)$$

где $T_{из}$ – измеренная температура БТС;

$T_{рсл}$ – расчетная и откорректированная температура БТС:

$$T_{рсл} = \frac{I_{нагр}^2}{\alpha F} R_c + 24^\circ\text{C} + \Delta T_{ос}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплопередачи; F – площадь поверхности болтового соединения; $\Delta T_{ос} = (T_{ос} - 24^\circ\text{C})$ – приращение температуры окружающей среды относительно 24°C ; $R_c = R_{сc} + R_{np}$ – суммарное сопротивление болтового соединения и переходного сопротивления контакта; $I_{нагр}$ – ток, протекающий в БТС.

Выражения (1) и (2) показывают функциональную зависимость температуры БТС от тока нагрузки, температуры окружающего воздуха и величины

переходного сопротивления БТС. При нестационарном и случайном изменении тока, а также в переходных режимах изменения величин тока и температуры окружающего воздуха, температура БТС изменяется с запаздыванием. Время запаздывания зависит от постоянного нагрева БТС. В момент снижения величины тока или температуры окружающего воздуха, величина измеренной температуры БТС остается выше значения температуры исправного БТС. Это приводит к ложному определению начального момента ослабления БТС и ложному срабатыванию устройства защиты ЭО. Характер изменения токовой нагрузки обусловлен не только технологическим режимом работы оборудования, но и воздействием случайных факторов. Изменение напряжения на шине питающей подстанции может носить случайный характер и зависит от характеристик смежных электропотребителей.

В основу исследования режимных параметров сети и токов нагрузки легло использование методики контроля показателей качества электроэнергии с помощью самопишущих анализаторов спектра. В данном исследовании использован анализатор спектра «Флюк 435» (Украина), характеристики которого соответствуют сертификату системы измерений ISO 9001. В основе обработки экспериментально полученных данных использованы методы статистической обработки [13].

На рис. 1 представлена осциллограмма изменения тока нагрузки рентгеновского компьютерного томографа модели TSX-031 Alexsion 16 (Японии), паспорт № ПТ-148-2012, генератор мощностью 42 кВт, анодное напряжение 135 кВ. На рис. 1 показан режим работы томографа, который работает в повторно кратковременном режиме и стационарном характере питающего напряжения сети.

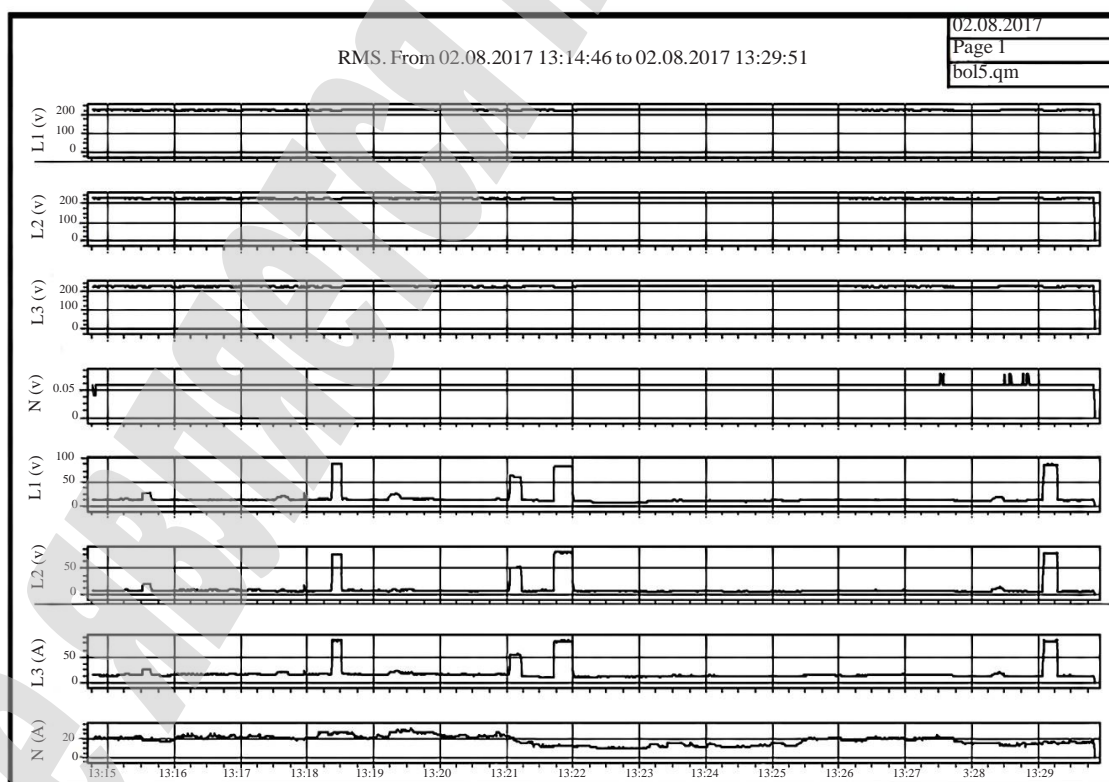


Рис. 1. Осциллограмма потребления тока рентгеновского компьютерного томографа, работающего в повторно кратковременном режиме и стационарном характере питающего напряжения

На рис. 2 представлена осциллограмма изменения тока нагрузки рентгеновского компьютерного томографа, работающего при нестационарном характере питающего напряжения.

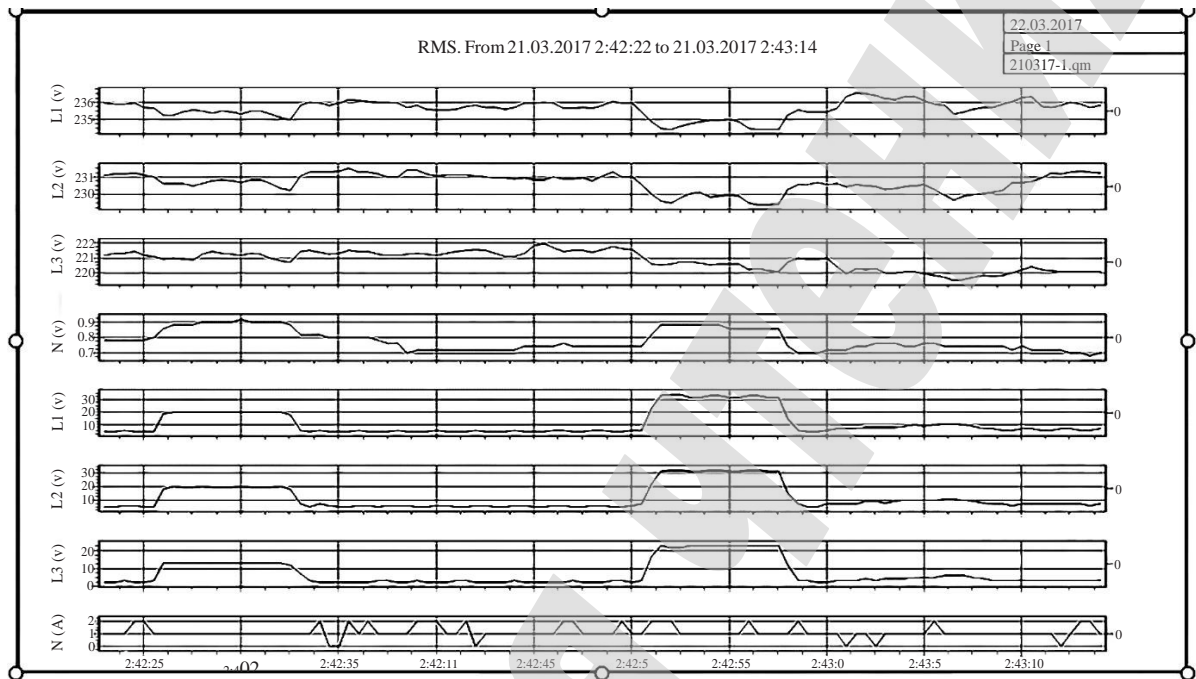


Рис. 2. Осциллограмма изменения тока рентгеновского компьютерного томографа, работающего при нестационарном характере питающего напряжения

Для выявления корреляционной зависимости тока, протекающего в БТС, при изменении уровней напряжения в сети произведены исследования статистическим методом. Для участка, где изменение величины тока не связано с технологическим процессом (рис. 2), расчеты статического математического ожидания тока и напряжения проведены по выражению [13]:

$$M_I = \frac{1}{n} \sum_i^n I_i, \quad M_U = \frac{1}{n} \sum_i^n U_i. \quad (3)$$

А также статической дисперсии тока и напряжения по выражению:

$$D_I = \frac{1}{n} \sum_i^n (I_i - M_I)^2, \quad (4)$$

$$D_U = \frac{1}{n} \sum_i^n (U_i - M_U)^2.$$

Статистическое среднее квадратическое отклонение по выражению:

$$\sigma_I = \sqrt{D_I}, \quad \sigma_U = \sqrt{D_U}. \quad (5)$$

А для выявления степени зависимости изменения величины тока от изменения величины напряжения статический корреляционный момент определяется по выражению:

$$k_{I,U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - M_I)(U_i - M_U). \quad (6)$$

В табл. 1 приведен протокол измерений величин тока и напряжений питающего электропотребителя полученных при измерениях (осциллограмма рис. 2).

Таблица 1

Протокол измерения тока и напряжения

№	I\A	U\B	№	I\A	U\B	№	I\A	U\B
1	7,1	238,6	11	6,8	232,1	21	7,3	242,1
2	7,2	239,0	12	7,4	241,0	22	7,4	243,1
3	6,9	237,1	13	7,3	239,0	23	7,2	239,2
4	6,7	230,1	14	6,5	230,1	24	6,8	231,0
5	7,2	241,2	15	6,4	227,0	25	6,7	230,2
6	7,1	241,2	16	6,8	230,1	26	6,5	229,1
7	7,3	242,2	17	7,2	240,1	27	7,4	239,0
8	6,9	236,0	18	7,3	240,0	28	6,8	231,1
9	7,1	239,2	19	7,3	235,1	29	6,5	235,5
10	7,0	227,0	20	7,1	236,1	30	6,9	236,1

Результаты обработки данных, приведенных в табл. 1:

$$M_I=7,01 \text{ A}, M_U=235,86 \text{ B}, D_I=0,1, \sigma_I=0,32, D_U=21,5, \sigma_U=4,64, k_{I,U}=2,07.$$

При корреляционном моменте $k_{I,U}=2,07$ ток и напряжения, связанные корреляционной зависимостью, т. е. случайные изменения величин напряжения питающей сети влияют на характер изменения величины потребляемого тока.

На рис. 3 представлен график изменения температуры БТС при стационарном и детерминированном изменении тока, протекающего в БТС.

На рис. 4 представлен график изменения температуры БТС при нестационарном, детерминированном и случайном изменении тока, протекающего в болтовом соединении.

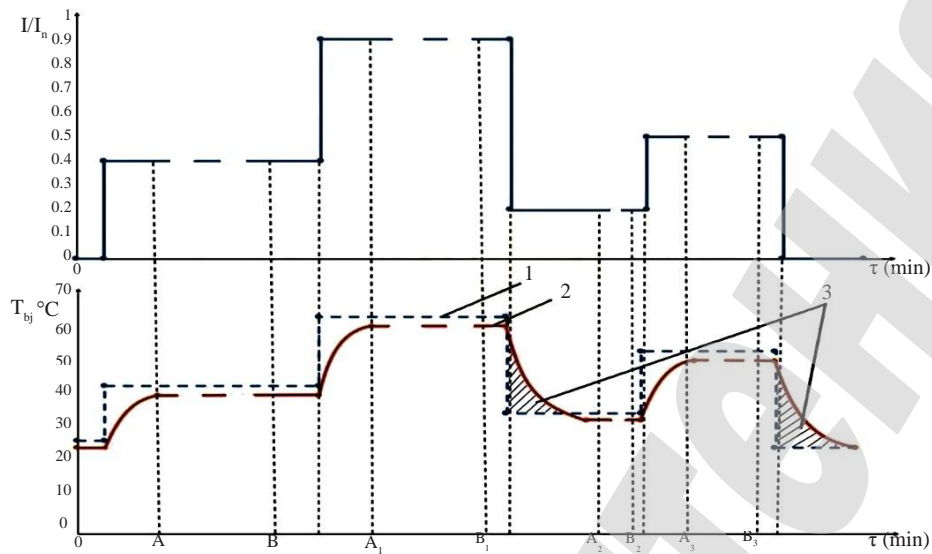


Рис. 3. График изменения температуры болтового токоведущего соединения при стационарном и детерминированном изменении тока

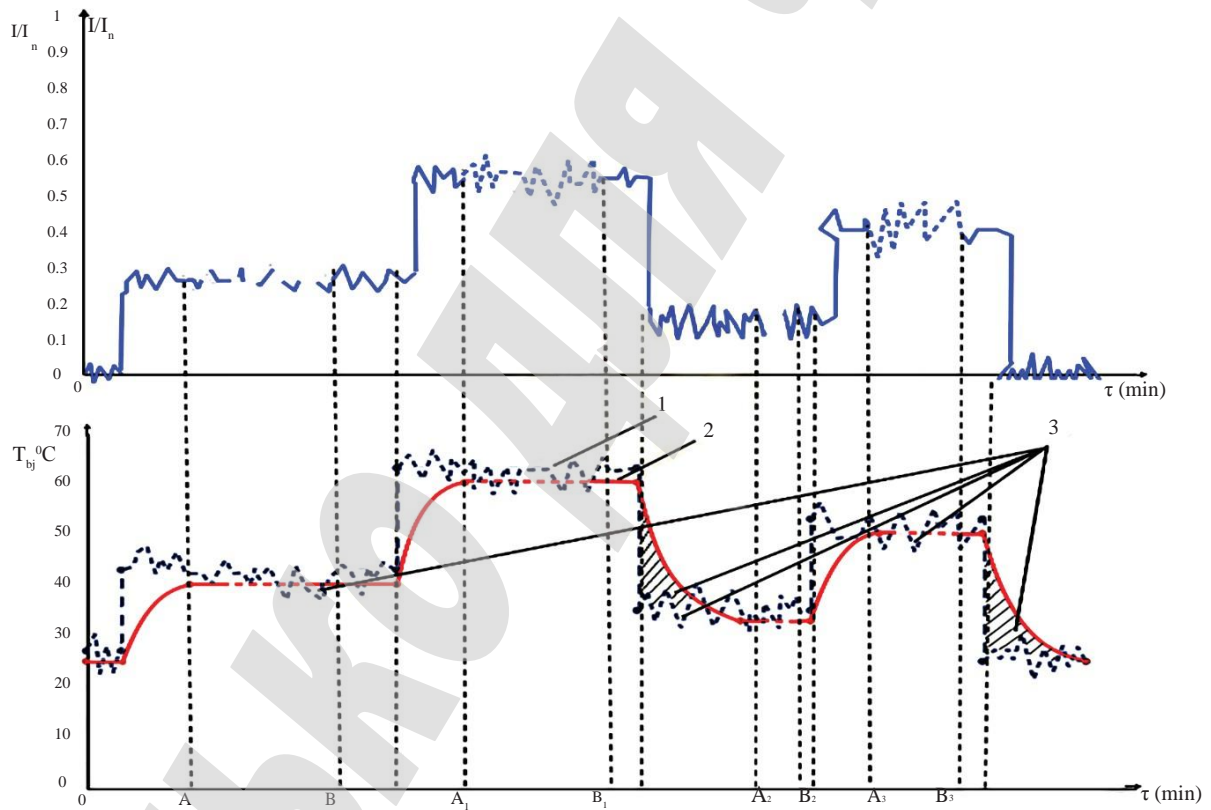


Рис. 4. График изменения температуры болтового токоведущего соединения при нестационарном и случайном изменении тока

На рис. 3, 4 обозначено:

1 – кривая изменения расчетной температуры БТС при неизменной температуре окружающего воздуха;

2 – кривая изменения температуры БТС, при протекании в нем тока;

3 – зоны ложного определения начального момента ослабления БТС.

Достоверное определение предаварийного состояния БТС для стационарного, но детерминированного режима изменения тока нагрузки и температуры окружающего воздуха возможно на участках стационарности. Участками стационарности является одновременное выполнение условий:

$$\frac{dI_n}{dt} = 0, \quad \frac{dT_{oc}}{dt} = 0, \quad \frac{dT_{уз}}{dt} = 0.$$

И только на этих участках проверяют выполнение неравенства (1).

Для достоверного определения предаварийного состояния БТС при случайном и детерминированном процессе изменения тока нагрузки и температуры окружающего воздуха аналоговые сигналы действующего значения тока, температур болтового соединения и окружающего воздуха преобразуем в дискретные значения, с выборкой равно $n=50$ и интервалом измерения:

$$\Delta t = \frac{T}{m50},$$

где T – интервал времени исследования контролируемого параметра; m – количество интервалов исследуемого параметра. Для числовой оценки контролируемых параметров определяем статистические математические ожидания и статистические среднеквадратические отклонения, выражения (3) и (5).

Первое условие для стационарной случайной функции является то, что математическое ожидание на интервале исследования должно удовлетворять условию:

$$M_x(t) = M_x = const. \quad (7)$$

Второе условие, которому, очевидно, должна удовлетворять стационарная случайная функция, это условие постоянства дисперсии на этом интервале:

$$D_x(t) = D_x = const. \quad (8)$$

Таким образом, временными участками стационарности для выявления начального момента ослабления БТС, при любых изменениях тока нагрузки и температуры окружающей среды, является выполнение условий:

$$M(I_{нав}) = const, \quad M(T_{уз}) = const, \quad M(T_{oc}) = const.$$

$$\sigma(I_{нав}) = const, \quad \sigma(T_{уз}) = const, \quad \sigma(T_{oc}) = const.$$

Величина расчетной и корректируемой температуры исправного болтового соединения на участках стационарности определится по выражению:

$$T_{р\text{сч}} = \left(\frac{(M(I_{нав}) + \sigma(I_{нав}))^2}{\alpha F} (R_{\text{сч}} + R_{np}) + 24^\circ\text{C} \right) + \Delta(M_{T_{\text{ос}}} + \sigma_{T_{\text{ос}}}). \quad (9)$$

Величина измеренной температура БТС определится выражением:

$$T_{из} = M_{T_{из}} - \sigma_{T_{из}}. \quad (10)$$

Полученные результаты вычислений статистических показателей расчетной температуры исправного БТС и статистические показатели измеренной температуры проверяется неравенством (1).

6. Результаты исследования

Полученные теоретические зависимости (1), (9) и (10) реализованные в устройстве диагностики состояния токовых цепей и начального момента ослабления БТС [12], блок схема которого приведена на рис. 5.

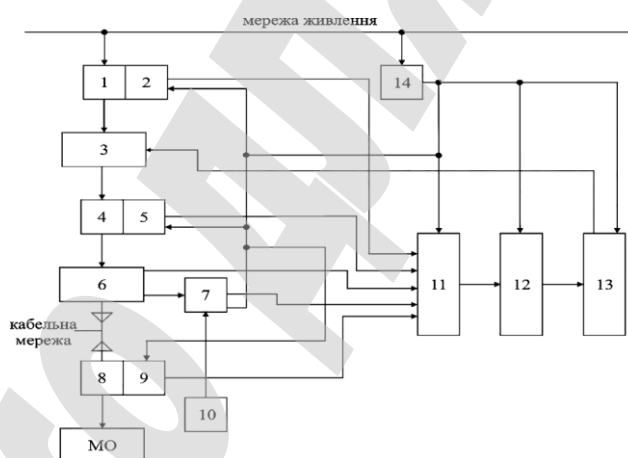


Рис. 5. Блок схема устройства диагностики состояния токовых цепей и болтовых токоведущих соединений

На рис. 5 обозначено:

- 1 – узел болтового соединения с датчиками температуры болтового соединения;
- 2 – блок измерения температуры болтового соединения;
- 3 – коммутационный аппарат;
- 4 – узел болтового соединения с датчиками температуры болтового соединения;
- 5 – блок измерения температуры болтового соединения;
- 6 – блок измерения силы фазных токов;
- 7 – блок преобразования токового сигнала в эквивалентный температурный сигнал и коррекция этого сигнала в зависимости от изменения температуры окружающей среды;
- 8 – узел болтового соединения с датчиками температуры болтового соединения;

- 9 – блок измерения температуры болтового соединения;
- 10 – блок измерения температуры окружающей среды;
- 11 – блок цифро-аналогового преобразования сигналов;
- 12 – микроконтроллер;
- 13 – блок управления и сигнализации;
- 14 – блок питания.

Для работы микропроцессора устройства (рис. 5) разработана компьютерная программа диагностики БТС и защиты ЭО при возникновении предаварийного режима. При составлении тестовых таблиц состояния БТС использовано множество булевых переменных.

Для того, чтобы выявить начальный момент ослабления БТС для стационарного и непрерывного процесса изменения тока и температуры окружающего воздуха введем аргументы булевых переменных характерных режимов эксплуатации ЭО:

- $X_1 = \langle 0 \rangle$ – логический нуль – при отсутствии тока;
- $X_1 = \langle 1 \rangle$ – логическая единица – при протекании тока в БТС;
- $X_2 = \langle 0 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{cl} + (24^\circ\text{C} - T_{nc})) > (T_{бз})$;
- $X_2 = \langle 1 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{cl} + (24^\circ\text{C} - T_{nc})) < (T_{бз})$;
- $X_3 = \langle 0 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{бз}) < (T_{кр})$;
- $X_3 = \langle 1 \rangle$ – при выполнении неравенства $(T_{бз}) > (T_{кр})$.

Совершенной дизъюнктивной новой формой (СДНФ), согласно [13], описывающей исправное и неисправное состояния БТС, является выражение:

$$F = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \cup (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap \bar{X}_2 \cap X_3). \quad (11)$$

где \cup , \cap , \bar{X} – соответственно, символы конъюнкции, дизъюнкции и отрицания.

Минимизированные булевы функции для различных режимов болтового соединения имеют вид:

- нормальному режиму работы соответствует оценочная функция:

$$F_{p.p} = (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) = (1, 0, 0); \quad (12)$$

- появлению начального момента ослабления БТС соответствует оценочная функция:

$$F_{осл.бз} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) = (1, 1, 0); \quad (13)$$

– наступлению аварийного режима, приводящего к отключению ЭО, соответствует оценочная функция вида:

$$F_{ав.р.} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) = (1,1,1). \quad (14)$$

Для построения диагностических тестов выявления начального момента ослабления БТС для стационарного и детерминированного режимов тока и температуры окружающего воздуха введем дополнительные аргументы булевых переменных:

- X_4 – «0» – при выполнении условия $\frac{dI_n}{dt} \neq 0$;
- X_4 – «1» – при выполнении условия $\frac{dI_n}{dt} = 0$;
- X_5 – «0» – при выполнении условия $\frac{dT_{nc}}{dt} \neq 0$;
- X_5 – «1» – при выполнении условия $\frac{dT_{nc}}{dt} = 0$;
- X_6 – «0» – при выполнении условия $\frac{dT_{\text{бз}}}{dt} \neq 0$;
- X_6 – «1» – при выполнении условия $\frac{dT_{\text{бз}}}{dt} = 0$.

Выражение СДНФ шести переменных имеет $2^6 = 64536$ составляющих.

Используя минимизированные дизъюнктивные булевы функции режимов для определения исправного и неисправного состояния БТС получим выражения:

– наступление начального момента ослабления БТС соответствует функция:

$$F_{осл.бз.} = \left(X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3 \right) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,0,1,1,1). \quad (15)$$

– наступление аварийного режима, определяющего момент отключения ЭО от сети, соответствует булева переменная вида:

$$F_{ав.р.} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,1,1,1,1). \quad (16)$$

где \sim – символ эквивалентности.

Для построения диагностических тестов выявления начального момента ослабления БТС для случайного и детерминированного режима тока и температуры окружающего воздуха дополнительными аргументами булевых переменных будут выражения:

- X_4 – «0» – при выполнении условия $M_{I,i} - M_{I,i+1} \neq 0$;
- X_4 – «1» – при выполнении условия $M_{I,i} - M_{I,i+1} = 0$;
- X_5 – «0» – при выполнении условия $M_{T_{nc},i} - M_{T_{nc},i+1} \neq 0$;
- X_5 – «1» – при выполнении условия $M_{T_{nc},i} - M_{T_{nc},i+1} = 0$;
- X_6 – «0» – при выполнении условия $M_{T_{\text{бз}},i} - M_{T_{\text{бз}},i+1} \neq 0$;

– X_6 – «1» – при выполнении условия $M_{T_{63,i}} - M_{T_{63,i+1}} = 0$.

Оценочные булевы функции выявления начального момента ослабления БТС и аварийного режимов при случайных изменениях тока будут определяться выражениями:

– наступлению начального момента ослабления БТС соответствует функция:

$$F_{\text{осл.бз.}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,0,1,1,1); \quad (17)$$

– наступление аварийного режима, который приводит до отключения ЭО от питающей сети соответствует функция:

$$F_{\text{ав.р.}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,1,1,1,1). \quad (18)$$

Учет режимов токов нагрузки и температуры окружающего воздуха позволяет повысить достоверность выявления предаварийной ситуации и избежать ложных срабатываний системы защиты ЭО при ослаблении БТС.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Учет режимных изменений тока нагрузки и температуры окружающего БТС воздуха позволяет увеличить чувствительность устройства при выявлении предаварийной ситуации и избежать ложных отключений оборудования. Своевременное выявление начального момента ослабления БТС позволяет обслуживающему персоналу планировать проведение профилактических работ без аварийных отключений оборудования.

Weaknesses. Использование разработанных устройств увеличивает стоимость средств защиты оборудования.

Opportunities. Применение разработанных устройств и алгоритмов диагностики состояний БТС способствуют избеганию ущерба от ликвидации аварийной ситуации, простоя оборудования и недовыпуска готовой продукции. Использование разработанных устройств, например в медицинских учреждениях для защиты рентгеновских аппаратов, позволяет не допустить дополнительных вредных воздействий на больного при обследовании.

Threats. Исследованные аналоги устройств диагностики и защиты электрооборудования, проведенные автором, и экспертное заключение Института интеллектуальной собственности Украины, при выдаче патентов на изобретение, не выявило аналогичных мировых устройств, выполняющие вновь разработанные функции.

8. Выводы

1. Проведен анализ причин ложного срабатывания устройства выявления начального момента ослабления болтового токоведущего соединения. Данный анализ показал, что в условиях нестационарных и случайных режимов тока нагрузки, напряжения сети и температуры окружающего воздуха эти причины связаны с длительностью переходного процесса нагревания болтового токоведущего соединения. Поэтому усовершенствование теплового метода неразрушающего контроля состоит в

том, что диагностика начального момента ослабления болтового соединения проводится на участках стационарности, строго определенных разработанными требованиями.

2. Показано, что для построения диагностических тестов выявления начального момента ослабления болтового токоведущего соединения целесообразно использовать аргументы булевых переменных и минимизированные дизъюнктивные функции. Это позволило упростить алгоритм и компьютерную программу, а также повысило быстродействие устройств диагностики и защиты на 5–7 %.

Литература

1. Критерии диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре / Кривонос В. Е. и т. д. // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 1. С. 52–57.

2. Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням: Пат. № 107749 Україна 107749. МПК: G01N 27/24, H02K 15/12, G01N 25/72, H02H 5/04, H01R 31/00, G01N 27/20, G01R 13/00 / Кривонос В. Е. № а 201309491, заявл. 29.07.2013, опуб. 10.02.2014. Бюл. № 3. 4 с.

3. Brady J. Thermal Patterns Associated with Infrared Inspection of Electrical Systems. 2011. URL: <https://www.irinfo.org/05-01-2011-brady/>

4. Измайлов В. В., Наумов А. Е. Автоматизированная система прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений // Программные продукты и системы. 2008. № 2. С. 73–75.

5. A guide to low resistance testing. 2017. URL: https://www.techrentals.com.au/pdf_files/Megger_A_20Guide_20to_20Low_20Resistance_20Testing.pdf

6. Ustroystvo dlya kontrolya temperatury kontaknykh soedineniy v ustroystvakh, nakhodyashimsya pod vysokim napryazheniem: Pat. No. 2408120 RU. МПК: H02H5/04 / Kaplya N. G., Kaplya E. N. No. 2009115534/07; declared: 24.04.2009; published: 27.12.2010; Bul. No. 36. 5 p.

7. Genutis D. A. Infrared Inspections and Applications // NETA WORLD Winter. 2006–2007. URL: <https://studylib.net/doc/18260220/infrared-inspections-and-applications>

8. Electrical heating tube detection device: Pat. No. CN 102636686 A. 15.08.2012. URL: <https://patents.google.com/patent/CN203526081U/en>

9. Prystii avtomatychnoho monitorynhu stanu kontaknykh ziednan vysokovolnykh pidstantsii i linii elektroperedach: Pat. No. 104546 UA. МПК: H02H 5/04, H02G 15/12, H01R 13/02, H02G 15/08, G05B 19/05 / Teslia Yu. A., Diachenko M. D. No. a201301914; declared: 18.02.2013; published: 10.02.2014, Bul. No. 3.

10. Prystii avtomatychnoho monitorynhu stanu kontaknykh ziednan vysokovolnykh pidstantsii i linii elektroperedach: Pat. No. 104546 UA. МПК: H02H 5/04, H02G 15/12, H01R 13/02, H02G 15/08, G05B 19/05 / Teslia Yu. A., Diachenko M. D. No. a201301914; declared: 18.02.2013; published: 10.02.2014, Bul. No. 3.

11. Prystii diahnostuvannia oslablennia boltovykh strumoveduchykh ziednan i obryvu strumoveduchykh chastyn systemy elektropostachannia elektroprymacha: Pat. No. 127922 UA. МПК: H02H 5/04, H02K 15/12 / Kryvonosov V. E., Pirotti Ye. L. No. u201802711_2; declared: 19.03.2018; published: 27.08.2018; Bul. No. 16. 4 p.

12. Чистяков В. И. Курс теории вероятности. Москва, 1978. 224 с.