

В. Є. КРИВОНОСОВ, С. В. ВАСИЛЕНКО

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДІАГНОСТИКИ БОЛТОВОГО СТРУМОПРОВІДНОГО З'ЄДНАННЯ В УМОВАХ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ЗМІНЮЮТЬСЯ

Надійність передачі і розподілу електроенергії в портах, на судах та енергетичних підприємствах залежить від стану болтових струмопровідних з'єднань. Практика експлуатації показує, що 2 % випадків аварійних зупинок технологічних ліній та пожеж на електрообладнанні трапляються через послаблення болтових струмопровідних з'єднань. Основними причинами послаблення болтового з'єднання є динамічні зміни режимів експлуатаційних струмових навантажень та зміна кліматичних параметрів. Підвищити надійність болтових струмопровідних з'єднань можна використовуючи сучасні методи діагностики, які дозволяють ідентифікувати появу послаблення болтових з'єднань. Проаналізовано існуючі методи діагностики стану болтових з'єднань, які засновано на контролі температури болтового з'єднання. Встановлено, що використання таких методів для виявлення початкового моменту послаблення з'єднання є недоцільним, тому що вони реагують на аварійний стан болтового з'єднання, тобто на критичне значення температури. Для виявлення початкового моменту послаблення болтового з'єднання запропоновано одночасно контролювати величини струму навантаження і параметрів навколишнього повітря, що дозволяє підвищити достовірність виявлення предаварійних ситуацій. Для діагностики початкового моменту послаблення болтового з'єднання запропоновано використовувати оціночні булеві функції. Отримано аргументи булевих змінних для стаціонарного та безперервного процесу зміни струму та температури навколишнього середовища, стаціонарного та детермінованого процесу, випадкового та детермінованого процесу. Наведено мінімізовані булеві функції для нормального режиму роботи болтового з'єднання при появі початкового моменту послаблення та при настанні аварійного режиму.

Ключові слова: болтові струмопровідні з'єднання, послаблення, електрообладнання, діагностика, початковий момент, булеві функції, струм, температура.

В. Е. КРИВОНОСОВ, С. В. ВАСИЛЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИКИ БОЛТОВОГО ТОКОПРОВОДЯЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Надежность передачи и распределения электроэнергии в портах, на судах и энергетических предприятиях зависит от состояния болтовых токопроводящих соединений. Практика эксплуатации показывает, что 2 % случаев аварийных остановок технологических линий и пожаров на электрооборудовании случаются по причине ослабления болтовых токопроводящих соединений. Основными причинами ослабления болтового соединения являются динамические изменения режимов эксплуатационных токовых нагрузок и изменение климатических параметров. Повысить надежность болтовых токопроводящих соединений возможно используя современные методы диагностики, которые позволяют идентифицировать появление ослабления болтовых соединений. Проанализированы существующие методы диагностики состояния болтовых соединений, которые основаны на контроле температуры болтового соединения. Установлено, что использование таких методов для выявления начального момента ослабления соединения нецелесообразно, так как они реагируют на аварийное состояние болтового соединения, то есть на критическое значение температуры. Для выявления начального момента ослабления болтового соединения предложено одновременно контролировать величины тока нагрузки и параметров окружающего воздуха, что позволяет повысить достоверность обнаружения предаварийных ситуаций. Для диагностики начального момента ослабления болтового соединения предложено использовать оценочные булевы функции. Получены аргументы булевых переменных для стационарного и непрерывного процесса изменения тока и температуры окружающей среды, стационарного и детерминированного процесса, случайного и детерминированного процесса. Приведены минимизированные булевы функции для нормального режима работы болтового соединения при появлении начального момента ослабления и при наступлении аварийного режима.

Ключевые слова: болтовые токопроводящие соединения, ослабление, электрооборудование, диагностика, начальный момент, булевы функции, ток, температура.

V. KRYVONOSOV, S. VASYLENKO

MATHEMATICAL MODELS FOR DIAGNOSTICS OF A BOLTED CONDUCTIVE JOINT UNDER CONDITIONS OF CHANGING MODE PARAMETERS

The reliability of the transmission and distribution of electricity in ports, ships and energy enterprises depends on the condition of the bolted conductive joints. Operational practice shows that 2 % of cases of emergency shutdowns of technological lines and fires on electrical equipment occur due to the weakening of bolted conductive joints. The main reasons for the bolted joint weakening are dynamic changes in operating current loads and changes in climatic parameters. It is possible to increase the reliability of bolted conductive joints using modern diagnostic methods that allow identifying the appearance of bolted joint weakening. The existing methods for diagnosing the state of bolted joints, which are based on monitoring the temperature of the bolted joint, are analysed. It has been established that the use of such methods to identify the initial moment of the joint weakening is impractical, since they react to the emergency state of the bolted joint, that is, to the critical temperature value. To identify the initial moment of the bolted joint weakening, it is proposed to simultaneously monitor the values of the load current and the parameters of the ambient air, which makes it possible to increase the reliability of detecting pre-emergency situations. To diagnose the initial moment of the bolted joint weakening, it is proposed to use the estimated Boolean functions. Arguments of Boolean variables are obtained for a stationary and continuous process of changing current and ambient temperatures, a stationary and deterministic process as well as a random and deterministic process. The minimized Boolean functions are given for the normal operation of the bolted joint, when the initial moment of weakening appears and when the emergency mode occurs.

Keywords: bolted conductive joints, weakening, electrical equipment, diagnostics, initial moment, Boolean functions, current, temperature.

Постановка проблеми. У системі передачі та розподілу електроенергії в енергетичних підприємствах, портах і суднах 40 % всіх з'єднань здійснюється за допомогою болтових струмопровідних з'єднань (БСЗ). Статистичні дані показують, що у 1,5–2 % випадків причиною аварійної зупинки обладнання і пожеж є ослаблення БСЗ [1].

Причинами аварійного стану БСЗ є механічне ослаблення щільності контактів прилеглих поверхонь струмоведучих шин, кабельних наконечників, приєднань комутаційної апаратури тощо. Збільшення перехідного опору контакту, при протіканні по ньому струму навантаження, відповідно до закону Джоуля-Ленца, веде до перегріву з'єднання з подальшим розвитком аварії, а саме аварійного відключення електрообладнання, виникнення коротких замикань в мережі та пожеж [2, 3].

На появу градієнта температур в місці болтового з'єднання впливають зміна кліматичних параметрів, в діапазоні від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і динамічні зміни режимів експлуатаційних струмових навантажень. Динамічні зміни струму в межах $(0,1-1,1) \cdot I_n$, де I_n – номінальний струм навантаження, пов'язані з технологічним режимом; короточасні зміни струмів до $(5-7) \cdot I_n$ – з пусковими режимами постійно діючої електродинамічної сили в БСЗ з частотою 100 Гц, що виникають при протіканні струму в сусідніх проводах; динамічні відхилення напруг мережі в межах $\pm 10\% U_n$ викликають додаткові зміни струму, що протікає в БСЗ. Перераховані фактори діють на БСЗ і є причиною їх ослаблення [4]. Незважаючи на існуючі пристрої і способи діагностики БСЗ [5-10], поглиблене дослідження факторів, що впливають на ослаблення БСЗ є актуальним.

Мета роботи. Дослідження впливу рівнів напруг, що випадково змінюються, на величини струмів навантаження та температурні зміни БСЗ.

Матеріали досліджень. Для діагностики стану БСЗ широко використовують метод теплового неруйнівного контролю [2, 10, 11] як контактним, так і безконтактним способом, що дозволяє виявляти аварійний стан БСЗ не порушуючи технологічного процесу. Відомі методи і пристрої діагностики стану БСЗ, такі як установка плавких міток з легкоплавким припоєм (сплавом Розі), контактний вимір температури, тепловізійний контроль, використання світлочутливих індикаторів, встановлення біметалевих пластин під гайку БСЗ тощо реагують на аварійний стан ослабленого болтового з'єднання, тобто на температуру БСЗ, яка перевищує критичне значення. Контроль тільки температури БСЗ не дозволяє діагностувати передаварійну ситуацію ослаблення БСЗ, тобто початковий момент ослаблення.

Процес механічного ослаблення БСЗ, при відсутності зовнішніх кліматичних, вібраційних факторів і при стаціонарному характеру струмового навантаження, що не перевищує $0,5 \cdot I_n$, протікає від декількох діб до декількох місяців. Зростання струму навантаження від мінімальної величини до номінального значення, особливо в поєднанні зі зростанням температури навколишнього повітря,

приводить до нагрівання ослабленого БСЗ вище критичної температури за час 0,5–1 години і визначається величиною постійною нагріву БСЗ. Для виявлення передаварійної ситуації ослаблення БСЗ додатково виробляють контроль величини струму навантаження і параметрів навколишнього повітря, що динамічно змінюються [12, 13]. Контроль додаткових величин дозволяє виявити початковий момент ослаблення БСЗ. Однак, в цих технічних рішеннях виявлення передаварійної ситуації ослаблення БСЗ розглянуто для стаціонарних режимів струмового навантаження і напруги живильної мережі.

Функціональна структура методу визначення початкового моменту ослаблення БСЗ полягає в наступному:

1. Виявити ділянки стаціонарності контрольованих параметрів, температуру БСЗ, струм навантаження, температуру навколишнього середовища.
2. Контактно виміряти температуру БСЗ – $T_{убз}$.
3. Виміряти струм, що протікає в цьому БСЗ, і визначити розрахункове значення температури справного БСЗ – $T_{сі}$.
4. Виміряти температуру навколишнього повітря – $T_{нс}$.
5. Коригування розрахункового значення температури справного БСЗ – $T_{кр}$ – з урахуванням зміни температури навколишнього повітря – $T_{нс}$.
6. Порівняння значення температур $T_{кр}$ і $T_{убз}$.
7. За перевищенням розрахованої температури БСЗ роблять висновок про збільшення перехідного опору БСЗ, що є критерієм визначення початкового моменту розвитку аварійної ситуації.
8. При досягненні температурою БСЗ визначеного критичного значення має бути проведено відключення обладнання від мережі.

На рис. 1 представлена функціональна модель методу визначення початкового моменту ослаблення БСЗ, а на рис. 2 – графічна інтерпретація методу виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ.

На рис. 2 діапазон $(0-T^0C_1)$ і $(0-t_1)$ – робочий діапазон роботи обладнання; діапазон АВ $(T^0C_1-T^0C_2)$ і (t_1-t_2) – передаварійна ситуація; діапазон ВС $(T^0C_2-T^0C_3)$ і (t_2-t_3) – початок розвитку аварійного режиму; діапазон CD (T^0C_3) і (t_3-t_4) – аварійна ситуація (час прийняття рішення); діапазон DE (T^0C_3-0) і (t_4-t_5) – вихід обладнання з ладу.

Процес нагріву БСЗ, викликаний втратами у з'єднанні, що викликані струмами навантаження, з достатньою для практичних цілей точністю можна описати диференціальним рівнянням нагріву однорідного тіла [14], яке має вигляд:

$$T_{бз} = T_{убз} - (T_{убз} - T_{почат})e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

де $T_{бз}$ – температура БСЗ;

$T_{убз}$ – температура БСЗ у сталому режимі;

τ – постійна нагріву БСЗ;

$T_{почат}$ – початкова температура БСЗ, що викликана за рахунок нагріву початковими втратами та температурою навколишнього повітря.

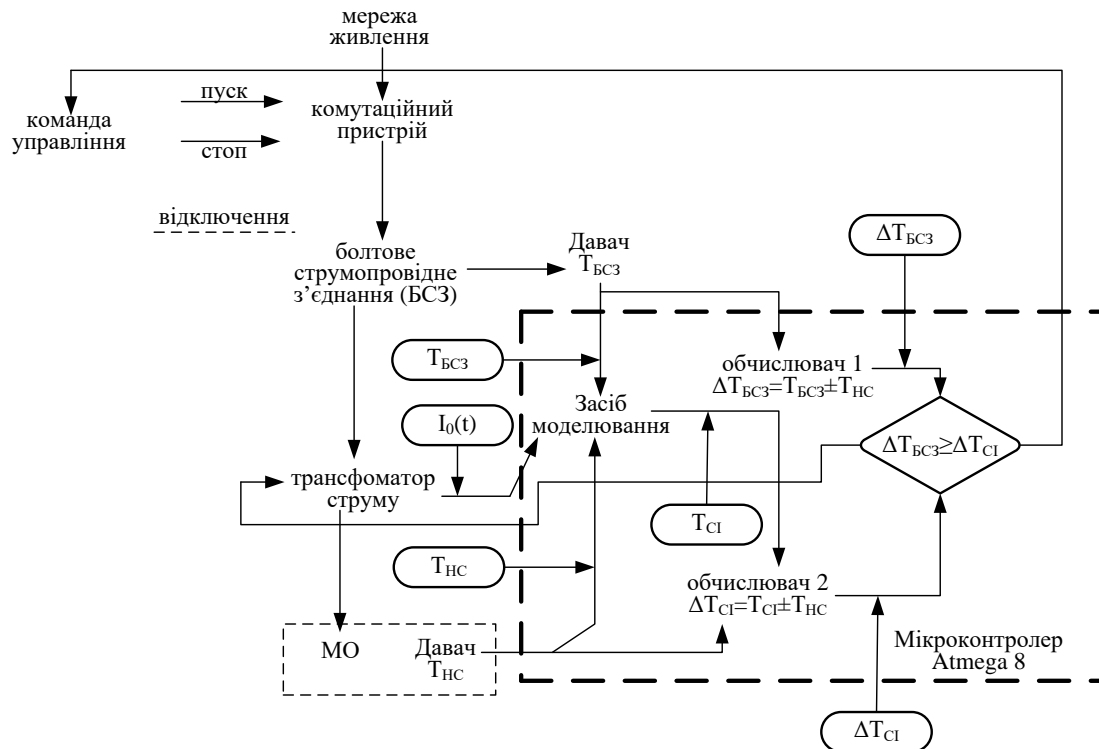


Рисунок 1 – Функціональна модель методу визначення початкового моменту ослаблення БСЗ

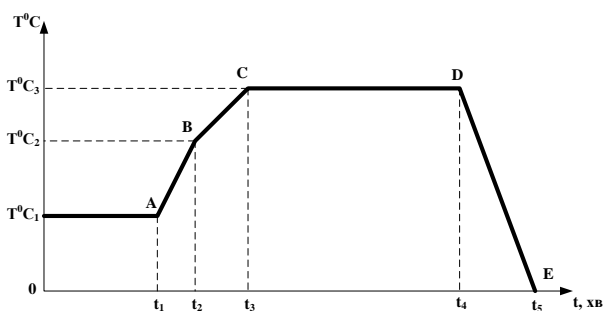


Рисунок 2 – Графічна інтерпретація методу виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ

Температура БСЗ у сталому режимі, з урахуванням збільшення температури навколишнього середовища, де за нульове значення прийнято значення, що дорівнює 24 °С, і при відсутності нагріву початковими втратами попереднього струмового режиму, згідно з [14], визначається за виразом:

$$T_{убз} = \frac{I_{нав}^2}{\alpha F} \cdot (R_{бс} + R_{пр}) + 24 \text{ } ^\circ\text{C} + \Delta T, \quad (2)$$

де $\Delta T = T_{нс} - 24^\circ\text{C}$;

$I_{нав}$ – струм навантаження;

α – коефіцієнт теплопередачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$;

F – площа контактного з'єднання;

$R_{бс}$, $R_{пр}$ – відповідно опір матеріалу БСЗ і перехідний опір БСЗ;

Вираз (2) показує аналітичну залежність температури БСЗ від струму навантаження, температури навколишнього повітря, величини

перехідного опору та температури, викликані початковим нагріванням БСЗ.

Функціональна залежність між реалізованими в методі параметрами має вигляд:

$$T_{убз} = f(I_{нав}^2, (R_{бз} + R_{пр}), T_{поч}, \Delta T). \quad (3)$$

Для оцінки залежності температури болтового з'єднання від температури навколишнього повітря для різних значень струмів навантаження проведені аналітичні та натурні дослідження. На рис. 3 наведено графіки зміни температури болтового з'єднання для різних значень сили струму і температур навколишнього повітря [14].

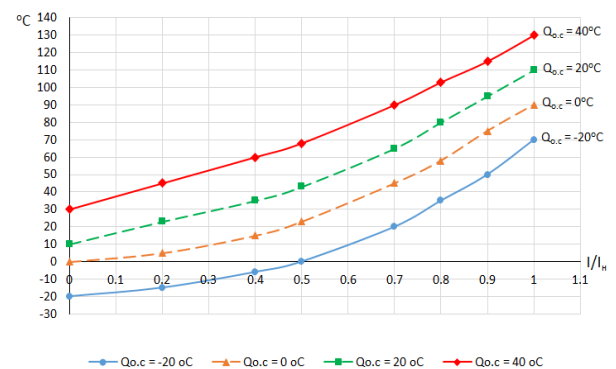


Рисунок 3 – Графік залежності температури БСЗ при протіканні в ньому струмів навантаження і температур навколишнього повітря

У сталому режимі температура БСЗ лінійно залежить від зміни температури навколишнього повітря.

На рис. 4 наведено графік, побудований за експериментальними та теоретичними даними зміни температури БСЗ для різних значень коефіцієнта послаблення БСЗ – $K_r = R_{oc}/R_{нор}$, де R_{oc} і $R_{нор}$ відповідно величина опору ослабленого і справного болтового з'єднання [14].

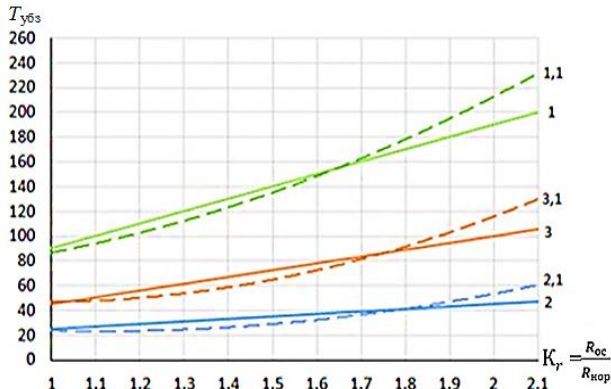


Рисунок 4 – Графік зміни температури БСЗ: крива 1 та 1.1 – розрахункова та експериментальна залежності відповідно для $I = 1,6 I_n$; криві 2 та 2.1 – розрахункова та експериментальна залежності відповідно для $I = I_n$; криві 3 та 3.1 – розрахункова та експериментальна залежності відповідно для $I = 1,2 I_n$

Аналіз отриманих результатів (рис. 4) показав, що розбіжності аналітичних та експериментальних досліджень, для номінального значення струму навантаження, не перевищують 1%, що дозволяє використовувати аналітичну залежність в реалізації розроблених способів і пристроїв визначення початкового моменту ослаблення БСЗ.

Для того, щоб виявити початковий момент ослаблення БСЗ для стаціонарного і безперервного процесу зміни струму і температури навколишнього повітря введемо аргументи булевих змінних характерних режимів експлуатації електрообладнання:

- $X_1 = \langle 0 \rangle$ – логічний нуль, при відсутності струму;
- $X_1 = \langle 1 \rangle$ – логічна одиниця, при протіканні струму в БСЗ;
- $X_2 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні нерівності $(T_{cl} + (24^\circ\text{C} - T_{нс})) > (T_{бз})$;
- $X_2 = \langle 1 \rangle$ при виконанні нерівності $(T_{cl} + (24^\circ\text{C} - T_{нс})) < (T_{бз})$;
- $X_3 = \langle 0 \rangle$ при виконанні нерівності $(T_{бз}) < (T_{кр})$;
- $X_3 = \langle 1 \rangle$ при виконанні нерівності $(T_{бз}) > (T_{кр})$.

Досконалою диз'юнктивною новою формою [2], що описує стан БСЗ, є вираз:

$$F = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \cup (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \cup (\bar{X}_1 \cap \bar{X}_2 \cap X_3) \quad (4)$$

де \cup, \cap, \bar{X} – відповідно символи кон'юнкції, диз'юнкції і заперечення.

Мінімізовані булеві функції для різних режимів болтового з'єднання мають вигляд:

- нормальному режиму роботи відповідає оціночна функція:

$$F_{н.р.р} = (X_1 \cap \bar{X}_2 \cap \bar{X}_3) = (1,0,0); \quad (5)$$

- появі початкового моменту ослаблення БСЗ відповідає оціночна функція:

$$F_{осл\ бсз} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) = (1,1,0); \quad (6)$$

- настанню аварійного режиму, що призводить до відключення електрообладнання, відповідає оціночна функція виду:

$$F_{ав.р.р} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) = (1,1,1). \quad (7)$$

Дослідження функціональної моделі методу виявлення початкового моменту ослаблення болтового з'єднання при стаціонарному та детермінованому процесі струмового навантаження. Характер зміни струмового навантаження обумовлений технологічним режимом роботи устаткування, а стаціонарний і детермінований характер зміни величини струму є окремим випадком нестаціонарного режиму. На рис. 5 наведено графік циклічної зміни струму навантаження на прикладі роботи рентгенівського комп'ютерного томографа (РКТ). Зміна величини струму дискретно, монотонно спадаючої або зростаючої призведе до появи перехідного процесу нагрівання БСЗ, при якому температура БСЗ буде змінюватися у напрямку згасання або зростання експоненціальної залежності. Зміна температури навколишнього повітря так само монотонно зростає або спадає. В режимі нестаціонарності струмового навантаження та температури навколишнього повітря важливим є виявлення ділянок стаціонарності контрольованих параметрів.

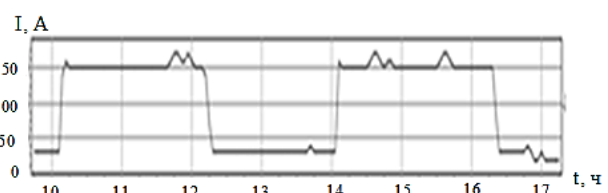


Рис. 5. Осцилограма циклічної зміни струмового навантаження РКТ

Для побудови діагностичних тестів виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ для стаціонарного та детермінованого режиму струму і температури навколишнього повітря введемо додаткові аргументи булевих змінних:

- $X_4 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні нерівності $\frac{dI_n}{dt} \neq 0$;
- $X_4 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні нерівності $\frac{dI_n}{dt} = 0$;
- $X_5 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні нерівності $\frac{d\theta_{нс}}{dt} \neq 0$;
- $X_5 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні нерівності $\frac{d\theta_{нс}}{dt} = 0$;

- $X_6 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні нерівності $\frac{d\theta_{63}}{dt} \neq 0$;
- $X_6 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні нерівності $\frac{d\theta_{63}}{dt} = 0$.

Булевих змінних функцій від шести змінних існує $2^6 = 64536$. Нижче представлені мінімізовані диз'юнктивні булеві функції режимів:

- настанню початкового моменту ослаблення БСЗ відповідає функція:

$$F_{\text{осл.бсз}} = (X_1 \cap X_2 \cap \bar{X}_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,0,1,1,1). \quad (8)$$

- настанню аварійного режиму, що визначає момент відключення електрообладнання від мережі, відповідає булева змінна виду:

$$F_{\text{ав.р.р.}} = (X_1 \cap X_2 \cap X_3) \sim (X_4 \cap X_5 \cap X_6) = (1,1,1,1,1,1). \quad (9)$$

У наведених вище функціях \sim – символ еквівалентності.

Дослідження функціональної моделі методу виявлення початкового моменту ослаблення болтового з'єднання при випадкових процесах зміни струму навантаження. Характер зміни струмового навантаження залежить не тільки від технологічного режиму роботи устаткування, але і від впливу випадкових факторів. Наприклад, зміна напруги на шинах підстанції живлення носить випадковий характер і залежить від добових, місячних і річних графіків навантаження мережі з яскраво вираженими мінімумами та максимумами навантажень. На рис. 6, представлена осцилограма зміни струму навантаження РКТ і напруги живлення на шині комплектної трансформаторної підстанції (КТП).

На ділянках, де зміна величини струму не пов'язана з технологічним процесом, розрахунки

статистичного математичного очікування струму та напруги проводять за виразами:

$$M_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \\ M_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i. \quad (10)$$

Статистична дисперсія струму навантаження та напруги визначається за виразами:

$$D_I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - M_I)^2, \\ D_U = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - M_U)^2. \quad (11)$$

Статистичне середньоквадратичне відхилення струму навантаження та напруги визначається за виразами:

$$\sigma_I = \sqrt{D_I}, \\ \sigma_U = \sqrt{D_U}. \quad (12)$$

Для виявлення ступеня залежності зміни величини струму від зміни величини напруги розрахуємо статистичний кореляційний момент за виразом:

$$k_{I,U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - M_I)(U_i - M_U). \quad (13)$$

У табл. 1, наведено протокол вимірювань величин струму споживання РКТ і напруги на шинах КТП.

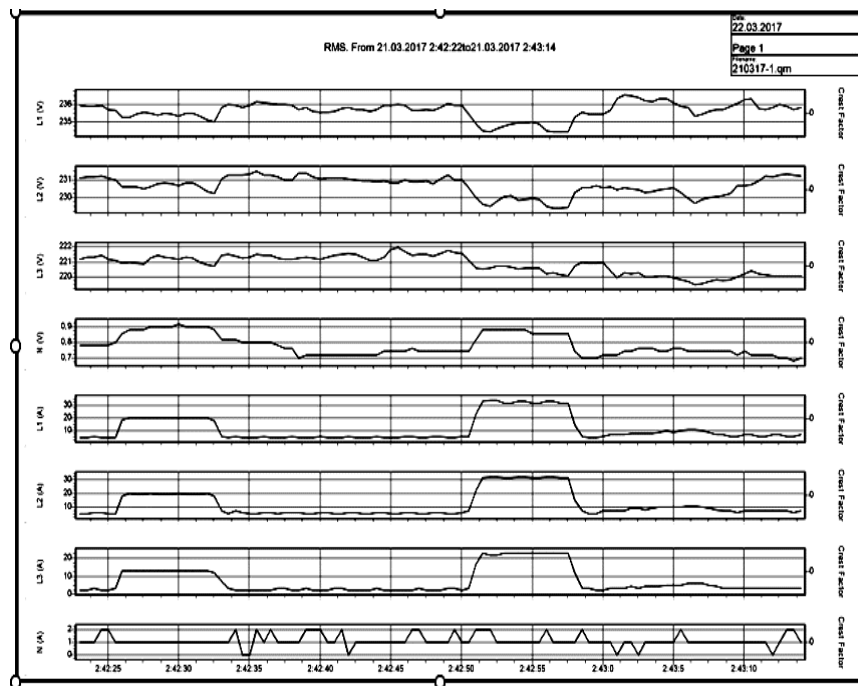


Рисунок 6 – Осцилограми струму навантаження РКТ і напруги на шинах КТП

Таблиця 1 – Протокол вимірювань величин струму споживання РКТ і напруг на шинах КТП

№ з/п	I, А	U, В	№ з/п	I, А	U, В	№ з/п	I, А	U, В
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

Нижче наведені числові значення визначених статистичних величин:

$$\begin{aligned}
 M_I &= 7,01 \text{ А}, \\
 M_U &= 235,86 \text{ В}, \\
 D_I &= 0,1, \\
 \sigma_I &= 0,32, \\
 D_U &= 21,5, \\
 \sigma_U &= 4,64, \\
 k_{I,U} &= 2,07.
 \end{aligned}$$

При кореляційному моменті $k_{I,U} = 2,07$ є підстави вважати, що струм і напруга пов'язані деякою залежністю, тобто випадкові зміни величин напруги впливають на зміни величини струму навантаження.

Безперервні функції діючого значення струму, температур БСЗ і навколишнього повітря перетворимо в дискретні значення з вибіркою, що дорівнює $n = 50$ і інтервалом вимірювання $\Delta t = \frac{T}{m_{50}}$, де T – інтервал часу дослідження контрольованого параметра, m – кількість інтервалів у стаціонарному режимі. Для числової оцінки їх значень використовуємо статистичне математичне очікування та статистичне середньоквадратичне відхилення.

Величина розрахункової, коригованої температури справного БСЗ у сталому режимі визначиться як:

$$T_{\text{кр}} = \frac{(M(I) + \sigma(I))^2}{\alpha F} (R_{\text{бз}} + R_{\text{пр}}) + (24^\circ\text{C} + \Delta T), \quad (14)$$

де $\Delta T = (M_{\text{Тнс}} + \sigma_{\text{Тнс}}) - 24^\circ\text{C}$;

$M(I)$ – математичне очікування струму навантаження на заданому інтервалі часу;

$\sigma(I)$ – середньоквадратичне відхилення струму навантаження;

$\sigma_{\text{Тнс}}$ – середньоквадратичне відхилення температури навколишнього повітря;

$M_{\text{Тнс}}$ – математичне очікування температури навколишнього повітря.

Виміряна температура БСЗ визначиться виразом:

$$T_{\text{бз}} = M_{\text{Тбз}} - \sigma_{\text{Тбз}}, \quad (15)$$

де $\sigma_{\text{Тбз}}$ – середньоквадратичне відхилення температури БСЗ;

$M_{\text{Тбз}}$ – математичне очікування температури БСЗ.

Ділянки контрольованих параметрів, в яких відсутні перехідні процеси, визначимо як порівняння математичних очікувань струму, температури навколишнього повітря і температури болтового з'єднання.

Для побудови діагностичних тестів виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ для випадкового та детермінованого режиму струму і температури навколишнього повітря введемо додаткові аргументи булевих змінних:

- $X_4 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умови $M_{I,i} - M_{I,i+1} \neq 0$;
- $X_4 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умови $M_{I,i} - M_{I,i+1} = 0$;
- $X_5 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\text{Тнс},i} - M_{\text{Тнс},i+1} \neq 0$;
- $X_5 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\text{Тнс},i} - M_{\text{Тнс},i+1} = 0$;
- $X_6 = \langle 0 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\text{Тбз},i} - M_{\text{Тбз},i+1} \neq 0$;
- $X_6 = \langle 1 \rangle$ – при виконанні умови $M_{\text{Тбз},i} - M_{\text{Тбз},i+1} = 0$.

Оціночні булеві функції виявлення початкового моменту ослаблення БСЗ і аварійного режимів при випадкових змінах струму будуть визначатися аналогічно (8) і (9) з урахування наведених вище аргументів булевих функцій.

Висновки. Для нестационарних і випадкових режимів струму виявлення початкового моменту контактного струмопровідного болтового з'єднання можливо тільки в ділянці одночасної стаціонарності контрольованих величин.

Для діагностики початкового моменту ослаблення БСЗ доцільно використовувати оціночні булеві функції. Застосування булевих функцій дозволяє розробити автоматизовані системи діагностики та захисту електрообладнання.

Врахування режимів струмів навантаження і температури навколишнього повітря дозволяє підвищити достовірність виявлення передаварійних ситуацій і уникнути помилкових спрацьовувань системи захисту електрообладнання при ослабленні БСЗ.

Список літератури

1. Вережкин В. Н., Смельков Г. И. *Пожарная опасность электрических контактов и контактных соединений*. Москва: МИЭЭ, 2009. 140 с.
2. Власов А. Б. Прогнозування довговічності контактних з'єднань за даними тепловізійної діагностики. *Електротехніка*. 2003. № 12. С. 27–33.
3. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Кавлак Р. С. Оценка переходного электрического соединения плашечного болтового соединения. *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Альхимова*. 2017. № 1 (26). С. 21–30.
4. Піротті Е. Л., Кривоносов В. С., Коваль Л. Г., Паламарчук М. І. Аналіз джерел факторів негативного впливу на експлуатаційну надійність силового електротехнічного обладнання (СЕТО) (за даними літературного контенту). *Вісник Хмельницького*

- національного університету. Технічні науки. 2019. № 1 (269). С. 249–253.
5. Сансербаев Е. А. *Динамический мониторинг и прогнозирование перегрева труднодоступных контактов элементов электрооборудования технологических комплексов: дис. ... канд. техн. наук: 6D071800*. Алматы, 2017. 149 с.
 6. Кривонос В. Е. Пат. 107749, Україна. *Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням*. 2006.
 7. СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007. Технічне діагностування електрообладнання та контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередачі засобами інфрачервоної техніки. Київ: Мінпаливенерго України, 2007. 130 с.
 8. Mackerle J. Finite element analysis of fastening and joining: A bibliography (1990–2002). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2003. Vol. 80, no. 4. P. 253–271. doi: 10.1016/S0308-0161(03)00030-9
 9. Водка А. А., Трубаев А. И., Степченко А. С. Исследование напряженно-деформированного состояния болтовых соединений рабочего колеса гидротурбины в условиях лабораторного эксперимента. *Надежность и долговечность машин и сооружений*. 2011. № 34. С. 155–162.
 10. Водка А. А. К вопросу о прочности и надежности болтовых соединений гидротурбин. *Механика та машинобудування*. 2012. № 1. С. 41–50.
 11. Наумов А. Е. Прогнозирование остаточного ресурса электроконтактных соединений на основе тепловизионной диагностики. *Вестник Тверского гос. техн. ун-та*. 2007. Вып. 10. С. 20–24.
 12. Грачева И. Е. Прогнозирование изменения сопротивления контактных низковольтных коммутационных аппарат различными методами. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2008. № 7–8. С. 44–51.
 13. Kryvonosov V. Diagnostics of the pre-fault situation of the bolted current-carrying joint in the conditions of changing regime parameters. *Technology audit and production reserves*. 2019. Vol. 1, no. 1 (45). P. 50–58. doi: 10.15587/2312-8372.2019.157865
 14. Кривонос В. Е., Злепко С. М., Вирозуб Р. М., Барановский Д. М. Критерии диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре. *Вимрювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. № 1 (57). С. 140–144.
 - danymy literaturnoho kontentu) [Analysis of sources of negative influencing factors on performance of power electrical equipment (SETO) (literature content data)]. *Herald of Khmelnytskyi national universit. Technical sciences*. 2019, no. 1 (269), pp 249–253.
 5. Sanserbaev E. A. *Dinamicheskii monitoring i prognozirovanie peregreva trudno dostupnykh kontaktov elementov elektrooborudovaniya tekhnologicheskikh kompleksov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 6D071800* [Dynamic monitoring and prediction of overheating of hard-to-reach contacts of electrical equipment elements of technological complexes. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Almaty, 2017. 149 p.
 6. Kryvonosov V. Ye. *Sposib kontrolyu za stanom boltovykh z'yednan' elektroobladnannya, shcho pratsyuє zi zminnym navantazhennyam* [Method for monitoring the condition of bolted connections on electrical equipment, operating with a variable load]. Patent UA, no. 107749, 2006.
 7. *SOU-N EE 20.577:2007. Tekhnichne diahnostuvannya elektroobladnannya ta kontaknykh z'yednan' elektroustanovok i povitryanykh liniy elektroperedachi zasobamy infrachervonoyi tekhniky* [Company Standard 20.577:2007. Technical diagnostics of electrical equipment and contact connections of electrical installations and overhead lines by means of infrared technology]. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2007. 130 p.
 8. Mackerle J. Finite element analysis of fastening and joining: A bibliography (1990–2002). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2003, vol. 80, no. 4, pp. 253–271. doi: 10.1016/S0308-0161(03)00030-9
 9. Vodka A. A., Trubaev A. I., Stepchenko A. S. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boltovykh soedineniy rabocheho kola gidroturbiny v usloviyakh laboratornogo eksperimenta* [Investigation of the stress-strain state of the bolted joints of a hydraulic turbine impeller under laboratory experimental conditions]. *Reliability and durability of machines and structures*. 2011, no. 34, pp. 155–162.
 10. Vodka A. A. *K voprosu o prochnosti i nadezhnosti boltovykh soedineniy gidroturbin* [To the question of strength and reliability of bolted joints in water turbines]. *Mechanics and mechanical engineering*. 2012, no. 1, pp. 41–50.
 11. Naumov A. E. *Prognozirovanie ostatochnogo resursa elektrokonyaknykh soedineniy na osnove teplovizionnoy diagnostiki* [Prediction of residual lifetime of electro-contact couplings based on thermal imaging diagnostics]. *Herald of Tber State University*. 2007, vol. 10, pp. 20–24.
 12. Gracheva I. E. *Prognozirovanie izmeneniya soprotivleniya kontaknykh nizkovol'tnykh kommutatsionnykh apparat razlichnymi metodami* [Predicting changes in the resistance of low-voltage switching devices using different methods]. *Proceedings of Higher Education Institutions. Energy Issues*. 2008, no. 7–8, pp. 44–51.
 13. Kryvonosov V. *Diagnostics of the pre-fault situation of the bolted current-carrying joint in the conditions of changing regime parameters. Technology audit and production reserves*. 2019, vol. 1, no. 1 (45), pp. 50–58. doi: 10.15587/2312-8372.2019.157865
 14. Krivonosov V. E., Zlepko S. M., Virozub R. M., Baranovskiy D. M. *Kriterii diagnostiki vintovykh soedineniy v ul'trazvukovoy tomograficheskoy apparature* [Criteria for diagnosis of screw connections to the ultrasonic tomographic equipment]. *Measurement and computation technique in technological processes*. 2017, iss. 1 (57), pp. 140–144.

Надійшло (received) 11.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кривонос Валерій Єгорович (Кривонос Валерій Єгорович, Kryvonosov Valery) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії та технологій Азовського морського інституту Національного університету «Одеська морська академія»; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-021X>; e-mail: yhtverf007@ukr.net.

Василенко Сергій Вікторович (Василенко Сергей Викторович, Vasilenko Serhii) – кандидат технічних наук, інженер-електрик ВАТ «САТЕЛЛІТ»; м. Маріуполь, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3146-4935>; e-mail: vasilenkosergey1983@gmail.com.