

РАЗРАБОТВАНЕ НА ЛАБОРАТОРЕН МАКЕТ С УЧЕБНО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ ЗА ПРАКТИЧЕСКО ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДИ ЗА ДИАГНОСТИКА НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТАКТНИ СИСТЕМИ

Валентин Гюров¹, Юлиян Йорданов², Биржан Илязов³

¹Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

²Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

³Технически университет-Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

DEVELOPMENT OF A LABORATORY MODEL WITH EDUCATIONAL PURPOSE FOR PRACTICAL APPLICATION OF METHODS FOR DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL CONTACT SYSTEMS

Valentin Gyurov¹, Yuliyani Yordanov², Birjan Ilyazov³

¹ Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment

² Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment

³ Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment

Abstract

The paper deals with the development of a laboratory model and a methodology for the practical application of various methods for the diagnosis of electrical contact systems. The development includes the application of contact methods with assessment of the permissible overheating temperature and thermal imaging diagnostics. The lab model is designed to operate at safe voltage levels (below 50 V). The methodology includes diagnostics of fixed detachable connections of bus-bar systems (Al and Cu) with different types of bolt connections, fixed contact connections of automatic circuit breakers and fuses and movable contact connections of relays and contactors for low voltage. The model developed has an educational purpose for improving the understanding of processes and phenomena, as well as obtaining practical experience in working with electrical equipment.

Keywords: electrical contact; diagnostics; laboratory model; thermal imaging.

ВЪВЕДЕНИЕ

Контролът на контактните съпротивления на съставни елементи от електрообзавеждането е от съществено значение за правилното, безопасно, надеждно функциониране на електроснабдителните и електропреносните системи. Разработени са множество аналитични и практически методи за контрол, които трябва да бъдат използвани съвместно за по-

точно установяване на действителното техническо състояние на съответните компоненти. Устойчивостта на множеството механични и електродинамични сили въздействащи на шинните системи и комутационна апаратура се определят още на фаза проектиране. Въпреки това надеждността на контактните съединения значително намалява в условията на експлоатация. В резултат на съвкупност

от външни фактори, като мястото и начина на монтаж, околна среда и техническо обслужване се влошават свойствата на контактните повърхности. Измерването на контактното съпротивление помага при идентифицирането на фретинг корозия [2] на контактите и позволява контактната корозия да бъде своевременно диагностицирана. Нарастването на контактното съпротивление над определени граници може да предизвика нежелан пад на напрежение. Разработеният учебен стенд цели добиването на практически умения и прилагане придобитите теоретични знания от студентите. Използването му ще спомогне за правилното разбиране на същността на проблема, методите за диагностициране и техническо обслужване на шинни системи и комутационно оборудване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При съединяване на две или повече повърхности се образува контактна площ, ограничена от геометричните им размери. Този контакт се нарича условен, тъй като фактическата площ на прилягане се различава от геометричната поради наличието на микроскопични неравности дори и при най-фината обработка. Влияние върху съпротивлението оказват също деформационни процеси, маслени, газови образувания и прах. Съвкупността от посочените фактори определя стойността преходното съпротивление на контакта.

$$R_{pr} = R_C + R_{CL} \quad (1)$$

Където: R_C - съпротивление от стесняване на токовите линии, [Ω]; R_{CL} - съпротивление на повърхностния слой, [Ω].

Съпротивлението R_C основно зависи от контактния натиск, броя на точките на съприкосновение, материала и формата на контактите, а също и от начина на обработка и състоянието на контактната повърхност. При многоточков контакт и еластична деформация на материала, то е равно на:

$$R_C = \rho \left(k \sqrt{\frac{E}{F r n^2}} \right), \quad (2)$$

където: ρ - специфично ел. съпротивление на материала, [Ωm]; k - коефициент; E - модул на еластичност на материала на контактите, [N/m^2]; r - радиус на кълбото, [m]; F - контактен натиск, [N].

При остатъчна деформация, когато контактният натиск превишава твърдостта на използвания материал, съпротивлението от стесняване се определя по формулата:

$$R_C = 0.5 \rho \left(\sqrt{\frac{\sigma_{cm} \cdot \pi}{F_n}} \right) \quad (3)$$

където: σ_{cm} – гранична якост на натиска [N/m^2]; $n=1$ за точков контакт; $n=2$ за линеен; $n=3$ за плоскостен.

Съпротивлението на повърхностния слой се определя от:

$$R_{CL} = \rho \frac{d}{S} \quad (4)$$

където: ρ - специфично съпротивление на слоя, [Ω/m]; d - дебелина на слоя, [m]; S - повърхност на съприкосновение [m^2].



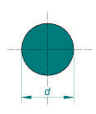
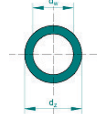
Шинните системи и комутационни апарати са изложени на механични вибрации от различен произход и източник на възбуждане. Стойността на вибрациите зависи от много фактори, които включват: начина на монтаж, геометрични размери, вид и качество на материала, от който са направени, както и броя на монтираните изолационни опори. Възможно най-лошият сценарий е когато собствената честота на шините и/или апарати съвпада с честотата на силите, въздействащи върху системата. Особено важно е честотата на собствените колебания да бъде различна от честотата на механичните колебания, предизвикани от действието на електродинамичните

сили [3], [4], [5], [6], [7]. В случаите на пълно или частично съвпадение възниква резонанс, който може да доведе до разрушителни последици за структурата. Специалистите по вибродиагностика често препоръчват собствената честота f_0 да се различава с 15% от удвоената честота на захранващото напрежение $2f_s$. В своите изследвания [5] авторите предлагат при проектиране да се избягват честотите в интервала:

$$f_0 = (1.7 \div 2.4) \cdot f_s \quad (5)$$

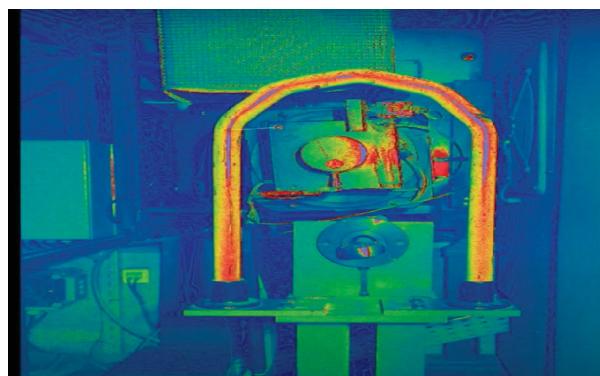
В случай, че изчислената честота не отговаря на тези изисквания, параметрите на системата трябва да бъдат променени. Таблица 1 представя препоръките [5] за определяне на честота за шини с опори в двата края при различни сечения и материал.

Табл. 1. Препоръки за определяне на честота при различни сечения и материал

Вид сечение и материал на шината				
Мед	$3,62 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$3,62 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$3,13 \cdot \frac{d}{l^2} \cdot 10^5$	$3,13 \cdot \frac{d_2^2 + d_1^2}{l^2} \cdot 10^5$
Алуминий	$5,17 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$5,17 \cdot \frac{b}{l^2} \cdot 10^5$	$4,48 \cdot \frac{d}{l^2} \cdot 10^5$	$4,48 \cdot \frac{d_2^2 + d_1^2}{l^2} \cdot 10^5$

Съществуват други вибродиагностични методи за оценка на разхлабването на основни възли, но те са основно контактни и са свързани със спиране на съоръжението. Сериозен напредък в тази посока са постигнали разработчици на софтуер и производители на високоскоростни камери. Чрез подходяща обработка на заснетите кадри могат да определят премествания от 0.25 [µm], което предоставя много големи възможности за определяне на разхлабване, на свързващи елементи от разстояние. С този тип синхронни измервания с лекота могат да бъдат определени резонансни явления, деформационни процеси на структурни елементи и вибрациите на цели системи във

всяка една точка. Въпреки все още високата цена са без кокуренция в определянето на някои видове дефекти от безопасно разстояние. Обработката на изображения дава големи възможности за определяне на различни дефекти в електрообзавеждането и комутационната апаратура (Фиг. 1). Новите функции, налични в софтуерните продукти на лидерите в бранша RDI Technologies, позволяват задълбочен анализ на векторите на движение на определени точки и измерване на промяната във времето.



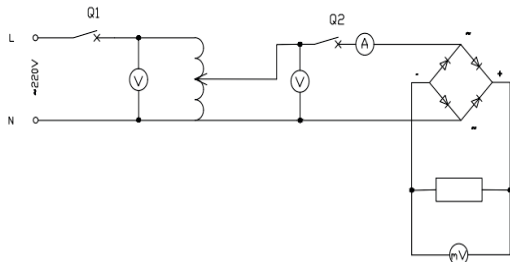
Фиг. 1. Динамично усилване на полученото изображение и определяне на еднакви амплитуди в вибропреместване или скорост на елементите за съответната честота на възбуждане [8]

Благодарение на новата функционалност е възможно да оценим амплитудите на вибрациите за избрана честота и да идентифицираме източника на вибрации.

РАЗРАБОТЕН УЧЕБЕН СТЕНД

Стендът включва: автотрансформатор за регулиране на напрежението (безопасно ниско) и тока. Захранващото напрежение се преобразува със схема Грег; 2 бр. автоматични прекъсвачи за предпазване от късо съединение на автотрансформатора и апаратите. Стендът дава възможност за оценка на подвижни и неподвижни, разглобяеми и неразглобяеми контактни съединения. Конфигурацията създава реална възможност за диагностика на неподвижни разглобяеми връзки на шинни системи (Al и Cu) с различни вид болтови съединения, неподвижни контакти на автоматични прекъсвачи и предпазители и подвижни контактни

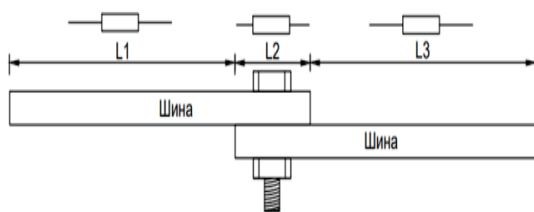
соединения на релета и контактори за ниско напрежение. Стендът позволява използването на директни и индиректни методи за определяне на съпротивлението. Класическият метод чрез пропускане на ток с контролирана стойност и измерване на получената загуба на напрежение [1]. В случая изпитанията се провеждат при $I=5$ и 10 А при безопасно напрежение $U=50$ V.



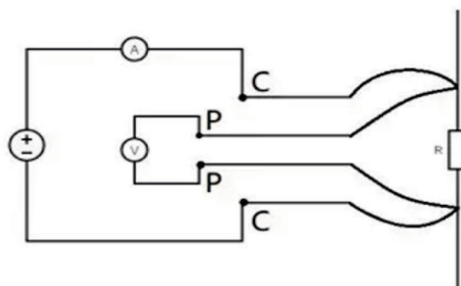
Фиг. 2. Принципно схема стенд



Фиг. 3. Основни елементи на учебния стенд



Фиг. 4. Едноболтово съединение



Фиг. 5. Двоен мост на Келвин

Друга възможност е да се използва измерване на контактното съпротивление с двоен мост на Келвин (дигитален уред).

В много от случаите се използват безконтактни методи, като термовизионна диагностика, които служат за косвена оценка на връзката между елементите, чрез определяне на загреването им. Проведено е експериментално изследване на стенд на контактното съпротивление на алуминиева шинна система с едноболтова и съответно триболтова съединение.

Методът с двоен мост на Келвин на Фиг. 5 е разновидност на Уитстонов мост. Измерването на съпротивлението е с 4 проводника и притежава висока точност. Може да измерва относително малка стойност на съпротивлението. Размери на алуминиева шинна система с едноболтова и триболтова връзка са дадени в Таблица 2.

Табл. 2. Размери на алуминиева шинна система

Вид шина	Едноболтова алуминиева.	Триболтова алуминиева.
L1	65 mm	40 mm
L2	25 mm	65 mm
L3	65 mm	40 mm

Използвайки геометричните размери на шините можем да изчислим теоретично съпротивлението в трите участъка чрез;

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (6)$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7)$$

Критерий за влошаването на контакта може да бъде зависимостта;

$$R_{изм} \leq 1,2 \cdot R_T \quad (8)$$

Получените изчислителни резултати за R_T и от измерването чрез мост на Келвин на R_K за двата вида шинни съединения са систематизирани в Таблица 3.

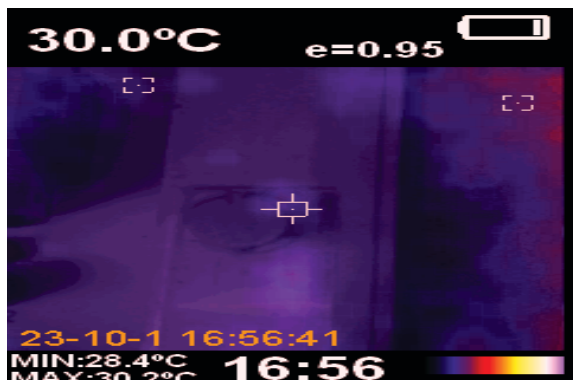
Табл. 3. Изчислителни резултати

Вид шинна система	R_T [$\mu\Omega$]	Ризм. [$\mu\Omega$]
Едноболтова алуминиева.	23,5	90
Триболтова алуминиева.	21,15	30

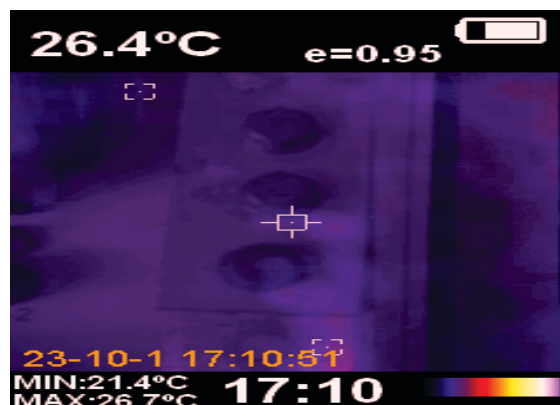
Използваната термовизионна камера е от ниския ценови клас с ограничени възможности, но получените изображения показват измененията на температурата в точките на контакт при разхлабване на връзката между шините. Представените изображения дават възможност за оценка на изменението на температурата за двата вида болтова връзка на алуминиеви шини. Използвани са същите елементи, както в проведеното експериментално изследване за определяне на контактно съпротивление на стенд. Измерванията са при нормален контакт и 16 минути след разхлабването на болтовата връзка номинален $I_n=4.64$ [A]. температура на околната среда 25°C.



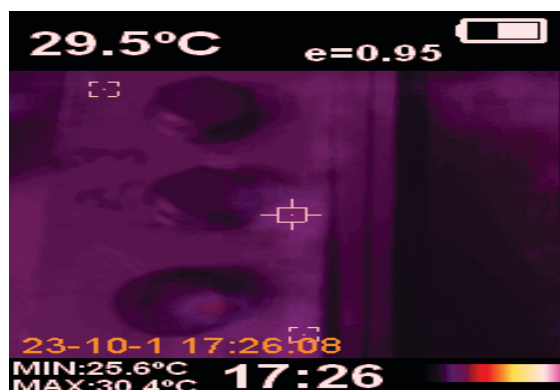
Фиг. 6. Термовизионно изображение на едноболтово съединение Al шина



Фиг. 7. Термовизионно изображение на едноболтово съединение Al шина



Фиг. 8. Термовизионно изображение на триболтово съединение Al шина



Фиг. 9. Термовизионно изображение на триболтово съединение Al шина

При едноболтовата връзка се отчита значително по-голямо нарастване - 5°C, а при триболтовата само 3°C, което напълно съответства на теоретичната постановка.

Представеният стенд не е съобразен с препоръките на един от малкото стандарти за определяне на контактно съпротивление на полюсите на прекъсвачи [2]. Препоръките не са спазени поради наличието на фактическа несъвместимост на изискването за ток на изпитване $I_{изп} > 50$ [A] с основното проектно предназначение учебен стенд и съответните съображения за безопасност при експлоатацията му от студенти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализацията на стенда способства за повишаване на практическите умения на студентите, позволява използването на различни аналитични и практически ме-

тоди за оценка и предлага широки възможности за експериментална дейност.

Стендът показва задоволителни резултати и точност при определяне на стойността на контактното съпротивление на шинни системи с класически методи. Разглежданата проблематика повдига много въпроси и излага мнението за нужда от осъвременяване и/или допълване на наличната нормативна база и стандарти в разглежданата област.

REFERENCE

- [1] ASTM B539-20 Standard Test Methods for Measuring Resistance of Electrical Connections (Static Contacts).
- [2] Bian C., Zhang Z., Zhao K., Shu T., “Study on Mechanical Vibration Characteristics of GIS Bus Misalignment Based on FEM,” High Voltage Apparatus, vol. 56, no. 6, pp. 72–79, 2020.
- [3] Zhang S., Zhang K., Yue B., “Analysis on Abnormal Vibration and its Time-Varying Force of GIS,” High Voltage Apparatus, vol. 56, no. 10, pp. 155–160+167, 2020.
- [4] Szulborski M., Łapczyński S., Kolimas L., Kozarek L., Calculations of Electrodynamical Forces in Three-Phase Asymmetric Busbar System with the Use of FEM, October 2020, Energies 13(20):5477
DOI:10.3390/en13205477.
- [5] Sitnikov M., Sepp I., Modelling of Contacts Vibration’s Influence on Electromechanical Objects’ Exploitation Parameters, November 2020, DOI:10.1109/DVM49764.2020.9243889, Conference: 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), At: Samara, Russia.
- [6] Yang D., Yuzhao L., Han Y., Ding B., Liangshu L., Wu J., Vibration Analysis and Experimental Study of GIS Busbar Enclosure under Electric Force, Hindawi, Shock and Vibration, Volume 2022, Article ID 3055139.
- [7] <https://vims.pl/case-study/>
- [8] Колев, Н., А. Лазаров, Е. Манов, Б. Митраков В. Туренков, Електрически измервания, 1993, Издателство на ТУ-София.