

prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI  
Instytut Energoelektryki  
mgr inż. KRZYSZTOF RUTECKI  
Instytut Telekomunikacji,  
Teleinformatyki i Akustyki  
Politechniki Wrocławskiej  
dr inż. GRZEGORZ WIŚNIEWSKI  
dr inż. ZBIGNIEW FJAŁKOWSKI  
Wydział Techniczny  
Kolegium Karkonoskie w Jeleniej Górze

## Klasyfikacja i zdalna kontrola procesu degradacji łączników z teletransmisją danych

*W artykule przedstawiono i omówiono sposób rozmieszczenia wieloparametrowego układu diagnostycznego bazującego na wielokryterialnym pomiarze wraz z systemem transmisji danych dotyczących przebiegu procesu nagrzewania się zestyków łączników mechanizmowych oraz degradacji powierzchni stykowych.*

### 1. WPROWADZENIE

---

W celu określenia rozmiarów i postępu degradacji technicznej danego urządzenia (np. łączy stykowych) bardzo przydatnym może być wykorzystanie zdalnej kontroli wybranych jego parametrów. Istnieje możliwość na przykład (dla celów diagnostyki) opracowania odpowiedniego systemu oceny charakteru tak jakościowego jak i ilościowego widma emisyjnego wyładowania elektrycznego w szczelinie stykowej podczas przerywania prądu elektrycznego. Możliwy jest też zdalny pomiar temperatury zestyku, jak i innych parametrów elektrycznych czy mechanicznych wraz z systemem transmisji danych. Dane pomiarowe w takim układzie mogą być transmitowane za pomocą sieci GSM do dedykowanego serwera WWW, a następnie przesyłano je do bazy danych SQL.

W artykule przedstawiono i omówiono sposób rozmieszczenia wieloparametrowego układu diagnostycznego bazującego na wielokryterialnym pomiarze wraz z systemem transmisji danych dotyczących przebiegu procesu nagrzewania się zestyków łączników mechanizmowych oraz degradacji powierzchni stykowych.

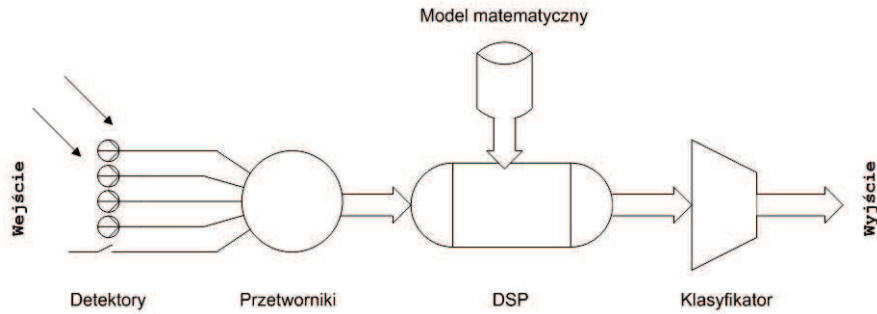
### 2. OBWÓD POMIAROWY ORAZ SYSTEM MONITORINGU

---

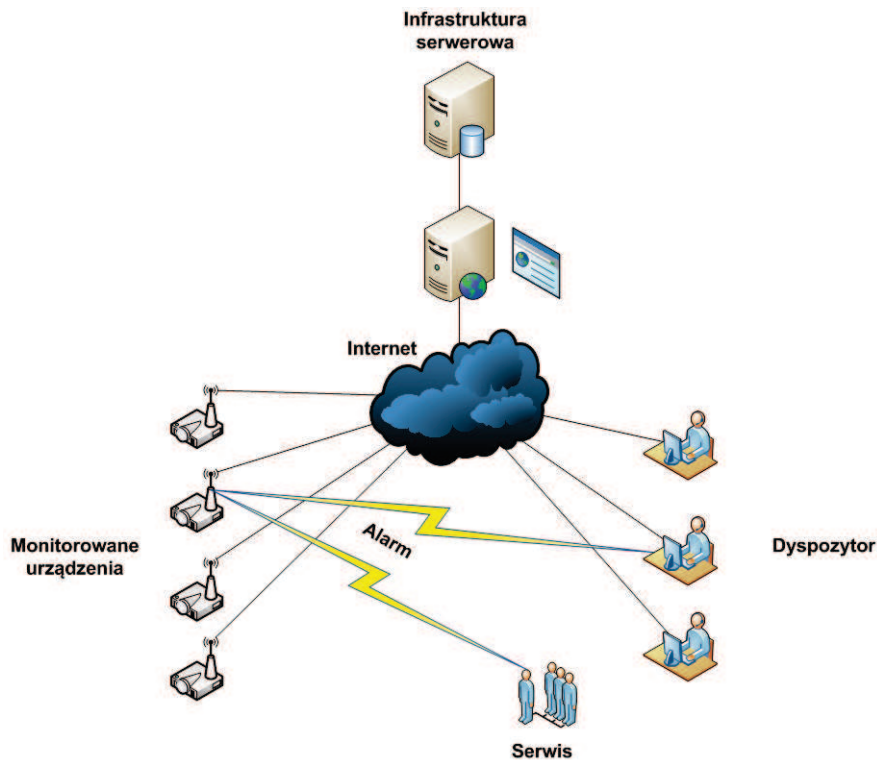
Do analizy możliwości zastosowania wieloparametrowego układu diagnostycznego wykorzystano dane pomiarowe z badań widma emisyjnego wyładowania elektrycznego pojawiającego się podczas otwierania zestyku, pomiaru temperatury oraz innych parametrów elektrycznych zestyku. Na podstawie wyników uzyskanych pomiarów, uznano, iż możliwe jest stworzenie kompleksowego rozwiązania automatycznego kontrolowania i ostrzegania o stopniu zużycia łącznika. Wstępne badania wykazały, iż charakterystyka widmowa oraz charakterystyka temperaturowa w obszarze zestyku ulega określonym zmianom, wraz z postępującym stopniem degradacji powierzchni stykowych.

Mając do dyspozycji takie informacje jak:

- sygnał sterujący łącznikiem (jako sygnał synchronizujący) – wartość skalarna  $Y$ ,
- sygnał z zestawu selektywnych detektorów optycznych (jako „obraz” widma) – wektor  $X$  o długości  $N$  (liczba detektorów),
- sygnał z detektorów optycznych temperatury – wektor  $X$ ,



Rys. 1. Schemat blokowy układu monitorującego



Rys. 2. Diagram systemu monitorowania

– historia pracy sterownika (w pamięci sterownika) – sekwencja etykietowanych, tworzących szereg czasowy wektorów  $X$ ,  
możliwe staje się zbudowanie urządzenia kontrolno-pomiarowego z funkcją wczesnego ostrzegania (z ang. *Early-Warning System*).

Schemat blokowy takiego układu monitorującego przedstawiono dla przykładu na rys 1. Składa się on z:

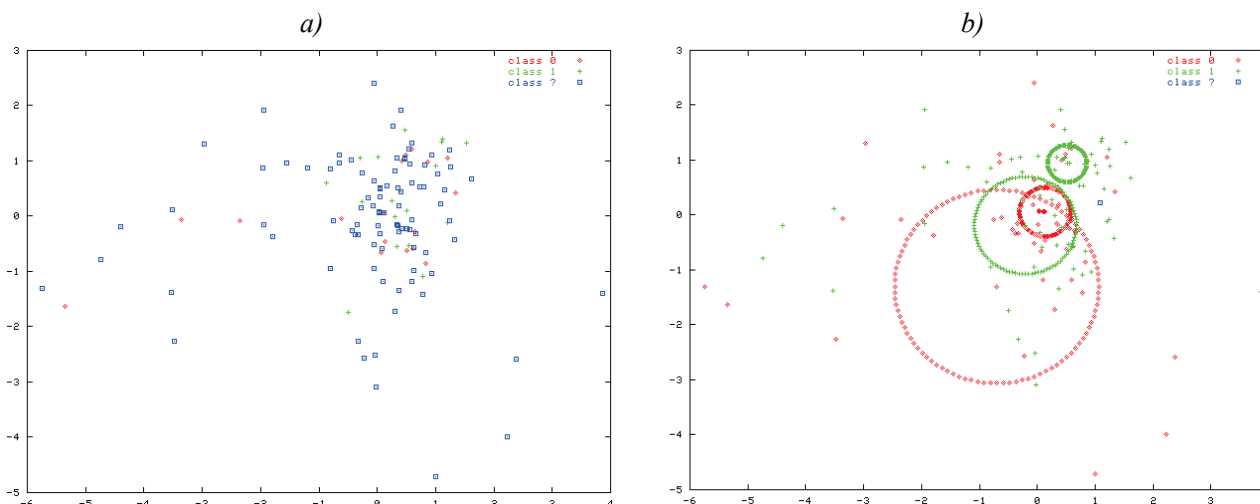
- macierzy selektywnych detektorów, gdzie każdy detektor jest czuły na wybraną długość fali;
- detektora termicznego, gdzie detektor jest czuły głównie na podczerwień;
- wejścia sygnału sterującego załączeniem/wyłączeniem łącznika;
- detektora przejścia przez zero (dla łącznika pracującego w układach zmiennoprądowych);
- modelu matematycznego w lokalnej bazie danych;

- obwodu cyfrowego przetwarzania sygnału DSP (z ang. *Digital Signal Processing*);
- klasyfikatora (układ podejmowania decyzji),
- obwodu wyjściowego (np. terminal GSM, ekran LCD, kontrolki).

Układ monitorowania pracy łącznika w połączeniu z terminalem GSM/GPRS umożliwia zbudowanie całej sieci nadzorowanych i kontrolowanych łączników. Przykładowa organizacja takiego systemu przedstawiona została na rys. 2. Wyróżnić w niej można 4 podstawowe bloki:

- szereg instancji układów monitorujących,
- infrastruktura serwerowa,
- dyspozytorzy monitorujący system 24godz/dobę,
- sieci GSM oraz Internet.

Uzupełnieniem systemu jest zespół obsługi technicznej, odpowiedzialny za utrzymanie systemu w ciągłym działaniu. Zespół ten nie wymaga jednak



Rys. 3. Wizualizacja techniki klastrowania wektorów dwuwymiarowych

dostępu do danych pomiarowych, gdyż informowany jest przez urządzenie bezpośrednio, za pomocą krótkich wiadomości SMS. Taki model działania systemu zapewnia pełną redundancję ścieżki przepływu informacji. Chwilowy na przykład brak dostępu do sieci Internet lub awaria infrastruktury serwerowej, nie powoduje zatrzymania przepływu krytycznych informacji o stanie systemu. Najważniejsze bowiem jego dwa elementy, czyli łącznik oraz jego serwis, mogą działać niezależnie.

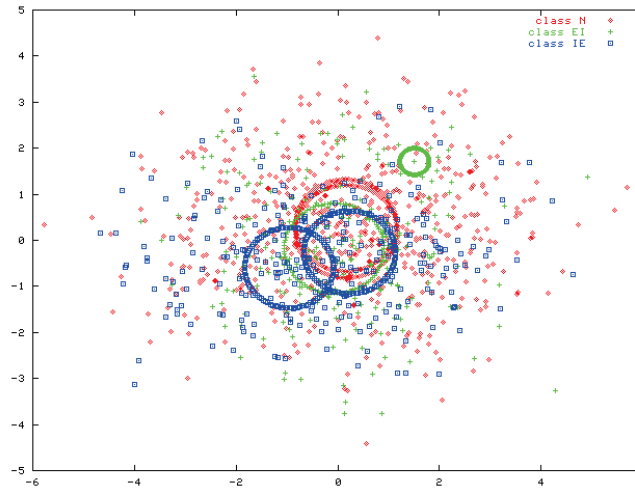
Gromadzone w bazie SQL dane mogą zostać użyte jako parametry wejściowe do ponownego „treningu” modelu matematycznego. Zgodnie z aksjomatem modeli statystycznych, każda dodatkowa porcja danych, użyta podczas uczenia modelu, podnosi jego skuteczność oraz precyzję działania (godnie z twierdzeniem Bayesa).

### 3. MODEL MATEMATYCZNY SYSTEMU MONITOROWANIA STANU ŁĄCZNIKA

Zasada działania zaproponowanego modelu matematycznego bazuje na idei rozpoznawania wzorców za pomocą analizy skupień. Kolejne wektory obserwacji  $X$  charakteryzują stan pracy łącznika i rozpinają przestrzeń  $N$ -wymiarową. Badania wykazują, iż w miarę jak postępuje degradacja zestyku, parametry termiczne oraz widmo emisyjne wyładowania elektrycznego w obszarze zestyku (a co za tym idzie wektor  $X$ ) zmienia swój charakter. Dodatkowo, zaobserwowane zmiany wykazują pewną tendencję kierunkową. Możliwe staje się zatem zbudowanie odpowiedniego statystycznego modelu matematycznego, opisującego to zjawisko. Ważne jest także, aby kilka pomiarów zostało przypisanych do danej klasy.

Przez pojęcie klasy rozumie się oczekiwany opis stanu łącznika. Najprostszy model zawiera dwie klasy (łącznik sprawny oraz łącznik uszkodzony), a przykładowy wektor opisujący stan łącznika (wektor  $X$ ) jest dwuwymiarowy. Na rys. 3 przedstawiono ideę statystycznego modelowania  $k$ -klastrow dla przykładowego scenariusza.

Na rysunku 3a), za pomocą koloru czerwonego oznaczono próbki zakwalifikowane do klasy „class 0” (np. łącznik sprawny). Za pomocą koloru zielonego do klasy „class 1” – łącznik uszkodzony. Kolorem niebieskim oznaczono kolejne pomiary, dla których klasa nie jest określona. Oś  $X$  wartości składnika wektora  $x_1$ , a oś  $Y$  to wartość  $x_2$ . W wyniku działania algorytmu  $k$ -mens [1], wyestymowano wartość centralną każdej klasy. W ujęciu fizycznym, środkiem klasy jest środek ciężkości. Na rysunku 3b) przedstawiono to za pomocą okręgów. W wyniki działania kolejnych iteracji algorytmu, klasa „przemieszcza” się w przestrzeni. Na rysunku 3b) przedstawiono dwie pierwsze iteracje za pomocą dwóch okręgów dla każdej klasy (mniejszy dla pierwszej iteracji, większy dla drugiej). Posiadając zatem model oraz pomiar, który chcemy przypisać do dowolnej klasy, obliczana jest odległość wektora (metryka euklidesowa) obserwacji do każdej klasy. Wynik obliczeń jest punktem wejścia do klasyfikatora. Dla twardego klasyfikatora, przynależność do danej klasy jest tylko wtedy, gdy wektor znajduje się w polu danej klasy (dla obligatoryjnie przyjętego promienia). Miękkodecyzyjny klasyfikator podaje zatem klasyfikację na podstawie wartości dwójki: klasa oraz odległość do niej. Dla pokazanego przykładu, dla dwóch klas mamy dwie wartości wynikowe. Zgodnie z podstawowym twierdzeniem Bayesa o prawdopodobieństwie, im więcej pomiarów „ręcznie” przypiszemy danej klasie na etapie estymowania



Rys. 4. Zaawansowana wizualizacja klastrowania większej liczby pomiarów

wartości środkowej klasy, tym większa jest skuteczność powstałego modelu. Na rys. 4 przedstawiono bardziej zaawansowany scenariusz, gdzie mamy większą ilość pomiarów.

Przedstawiona idea klastrowania to generalny model matematyczny. Dla przypadku jednak systemu monitorowania, np. stanu technicznego łącznika wymagane jest użycie bardziej rozbudowanego modelu. Nie można bowiem założyć, że klasa ma kształt, co może prowadzić do błędnego działania systemu. Właściwe wydaje się więc zastosowanie modelowania GMM [2] (z ang. *Gaussian Mixture Models*), gdzie klasy wektorów obserwacji  $X$  modelowane są za pomocą złożenia  $k$  krzywych Gaussa, a estymacja modelu jest dokonywana algorytmem E-M (z ang. *Expectation-Maximization*). Dla każdej wówczas klasy (stanu łącznika) estymowane są osobne modele. Klasyfikacja polega na obliczeniu funkcji dopasowania (z ang. *likelihood*) wartości zmierzonej do każdego modelu. Wartość parametru  $k$  dobierana jest na etapie budowania modelu matematycznego w sposób obligatoryjny. Wpływa ona bowiem znacząco na wymagania obliczeniowe stawiane układowi mikroprocesorowemu, dokonującemu stosownych obliczeń. Bez względu jednak na wybrany model (GMM czy prosty  $k$ -means) obwody wejściowe oraz wyjściowe pozostają takie same.

Formalny zapis modelu matematycznego dla modelu GMM i estymacji algorytmem EM realizowany jest jak poniżej [3]:

• *Założenia:*

Model GMM opisany jest w następujący sposób:

$$\theta = \{(w_i, \mu_i, \Sigma_i)\}_{i=1}^k \quad (1)$$

gdzie:

$w_i$  – wektor wag (relacji) pomiędzy składowymi normalnymi,

$u_i$  – wektor wartości średnich,

$\Sigma_i$  – macierz kowariancji.

Funkcja prawdopodobieństwa (dopasowania) wektora  $y$  do modelu  $\theta$  dana jest równaniem:

$$\begin{aligned} p(y|\theta) &= \sum_{i=1}^k w_i \phi(\mu_i, \Sigma_i) \\ &= \sum_{i=1}^k w_i \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(y - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (y - \mu_i)\right)}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_i|^{1/2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

oraz

$$\begin{aligned} w_i &> 0, \quad i = 1, \dots, k \\ \sum_{i=1}^k w_i &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$y$  – zmienna losowa (obserwacja).

• *Estymacja parametrów:*

Idea estymacji parametrów modelu GMM polega na iteracyjnej re-estymacji parametrów, tak aby w każdym kroku jakość modelu, jako miara funkcji dopasowania, była wyższa. Kolejne kroki algorytmu EM są więc następujące:

1. *Inicjalizacji parametrów modelu oraz estymacja wartości początkowej funkcji dopasowania  $L$  (krok  $m=0$ ):*

$$\begin{aligned} w_j^{(0)}, \mu_j^{(0)}, \Sigma_j^{(0)}, \quad j = 1, \dots, k \\ L^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \left( \sum_{j=1}^k w_j^{(0)} \phi(y_i | \mu_j^{(0)}, \Sigma_j^{(0)}) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

2. Obliczenie metryk (faza E)

$$\gamma_{ij}^{(m)} = \frac{w_j^{(m)} \phi(y_i | \mu_j^{(m)}, \Sigma_j^{(m)})}{\sum_{i=1}^k w_i^{(m)} \phi(y_i | \mu_i^{(m)}, \Sigma_i^{(m)})}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, k, \quad (5)$$

dla

$$n_j^{(m)} = \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}^{(m)}, \quad j = 1, \dots, k. \quad (6)$$

3. Estymacja nowych parametrów modelu (faza M)

$$\theta^{(m+1)} = \arg \max_{\theta \in \Theta} Q(\theta | \theta^{(m)}) \quad (7)$$

4. Re-estymacja nowej wartości funkcji dopasowania

$$L^{(m+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \left( \sum_{j=1}^k w_j^{(m+1)} \phi(y_i | \mu_j^{(m+1)}, \Sigma_j^{(m+1)}) \right) \quad (8)$$

5. Zakończenie, jeśli nie osiągnięto założonego przyrostu jakości  $\delta$ , inaczej skocz do punktu 2.

$$|L^{(m+1)} - L^{(m)}| > \delta \quad (9)$$

• Klasyfikacja:

Klasyfikacja zmiennej losowej  $y$  (obserwacja, pomiar) do danego modelu (danej klasy) odbywa się za pomocą obliczenia danego prawdopodobieństwa równaniem:

$$\begin{aligned} p(y | \theta) &= \sum_{i=1}^k w_i \phi(\mu_i, \Sigma_i) \\ &= \sum_{i=1}^k w_i \frac{\exp \left( -\frac{1}{2} (y - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (y - \mu_i) \right)}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_i|^{1/2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w_i &> 0, \quad i = 1, \dots, k \\ \sum_{i=1}^k w_i &= 1 \end{aligned}$$

Im wartość jest większa, tym większe prawdopodobieństwo przynależności danej obserwacji  $y$  do danego modelu GMM.

Generalna idea działania proponowanego rozwiązania jest następująca:

- na podstawie informacji (impuls sterujący łącznikiem), synchronicznie z włączaniem/wyłączaniem łącznika dokonywany jest pomiar;
- w wyniku pomiaru powstaje wektor obserwacji  $\mathbf{O}$ ,
- wektor ten poddawany jest normalizacji,
- układ DSP na podstawie modelu dokonuje klasyfikacji obserwacji do każdej klasy,
- wynik klasyfikacji przechodzi do obwodów wyjściowych poprzez klasyfikator.

Istotne jest tutaj zaznaczenie konieczności dokonywania normalizacji wektora. Jest to prosta operacja arytmetyczna, która gwarantuje minimalizację błędów wynikających, na przykład, z zabrudzenia danego detektora. W wektorze obserwacji opisującym widmo wyładowania elektrycznego w obszarze zestyku nie jest istotna wartość danego prążka widma, lecz jego wzajemna zależność z innymi prążkami. Podobna sytuacja zachodzi w wektorze obserwacji opisującym charakter temperaturowy zestyku. Nie jest tutaj istotna sama wartość bezwzględna temperatury (zmienia się ona wraz z charakterem obciążenia), ale wzajemna relacja przyrostu temperatury dla zestyku sprawnego i uszkodzonego. Obliczona wówczas norma jest bardziej stabilna.

Sygnal z układu DSP zawiera zatem wystarczającą informację o aktualnym stopniu zużycia zestyku. Umożliwia to wysterowanie elementu wykonawczego (np. sygnalizacji optycznej czy dźwiękowej), jak również może to posłużyć jako informacja dla terminala GSM. Odpowiednie oprogramowanie sterujące, zaimplementowane w procesorze terminala GSM (proponuje się moduł firmy Wavecom, charakteryzujący się wysokim stopniem integracji) umożliwia propagację informacji o stopniu degradacji zestyku on-line na serwer z bazą danych. Otwiera to możliwości ciągłego „podglądu” stanu technicznego zestyku. Dodatkową funkcjonalnością jaką oferuje terminal GSM, jest możliwość wysyłania krótkich wiadomości tekstowych SMS. Tu właściwie jest zaimplementowana funkcjonalność asynchronicznego (działającego zdarzeniowo) systemu wczesnego ostrzegania. O ile podgląd stanu zestyku on-line (np. za pomocą dedykowanej strony internetowej, gdzie stan zestyku jest wizualizowany w formie wykresu) wymaga interwencji operatora, wiadomości SMS mogą zostać wysłane autonomicznie. Terminal GSM zawiera bowiem listę numerów telefonów osób, odpowiedzialnych za utrzymanie właściwego stanu technicznego łącznika. Jeśli degradacja zestyku przekracza określone progi i/lub postępuje w stopniu szybszym niż wynika to z zadanej charakterystyki, terminal wysyła stosowne wiadomości. Możliwości budowania reguł i kryteriów są praktycznie nieograniczone. Istotne jest, aby właściwe służby zostały poinformowane w odpowiednim czasie o stanie konkretnego urządzenia. Otwiera to bardzo szerokie możliwości zastosowania, gdy na przykład podstawowym celem jest zapewnienie ciągłości pracy urządzeń czy systemów zależnych od stanu działania monitorowanego łącznika. Degradacji nie da się wprawdzie uniknąć, lecz mając odpowiedni monitoring możliwe jest zaplanowanie skutecznych, optymalnych procedur utrzymania ruchu.

### 3. PODSUMOWANIE

Dokładne odwzorowanie procesów cieplnych i wyładowczych zachodzących w obwodowych zestykowych łączników elektrycznych, zwłaszcza złożonych, jest skomplikowane i wymaga stosowania często skomplikowanych modeli matematycznych oraz znajomości wielu parametrów, których wartości są trudne do precyzyjnego określenia. W opracowaniu przyjęto zatem uproszczony model diagnostyczny bazujący na danych gromadzonych w procesie nagrzewania się zestyku oraz bazujący na charakterystykach widma emisyjnego przebiegu wyładowania elektrycznego zachodzącego w układach zestykowych. Opisany system zdalnej akwizycji danych prezentuje możliwości technologii bezprzewodowej transmisji danych i stanowi bazę dla bardziej wymagających aplikacji. Skalowalność zastosowanego rozwiązania i jej rozproszony charakter (obwody pomiarowe mogą być rozsiane po całej kuli ziemskiej, o ile mają dostęp do sieci GSM), a serwery WWW czy SQL mogą być zainstalowane w siedzibie firmy lub również rozproszone (klastrowa baza danych, odporna na uszkodzenia) stanowią bazę do dalszej rozbudowy i są praktycznie nieograniczone.

Opracowany system pomiaru, bazujący na wielokryterialnym pomiarze wraz z systemem transmisji danych, przesyłanych zdalnie za pomocą sieci GSM, a dotyczących przebiegu procesu nagrzewania się zestyku, pozwala na ciągłą kontrolę (on-line) stanu pracy zestyku. Może więc być z powodzeniem stosowany do diagnostyki stanu pracy wszelkiego rodzaju aparatury łączeniowej znajdującej się zwłaszcza w trudnych warunkach środowiskowych, czy też umieszczonej w kompaktowych rozdzielniach lub stacjach elektroenergetycznych.

#### Literatura

1. *MacQueen, J. B.*: Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. University of California Press. pp. 281–297.
2. *Dempster, A.P., Laird, N.M., Rubin, D.B.*: Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. Journal of the Royal Statistical Society.
3. *Chen Y., Gupta M.R.*: EM Demystified: An Expectation-Maximization Tutorial", UWEE Technical Report, Number UWEETR-2010-0002, University of Washington.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

#### CLASSIFICATION AND REMOTE CONTROL OF THE DEGRADATION PROCESS OF CONNECTORS WITH DATA TELETRANSMISSION

The article features a method to distribute a multi-parameter diagnostic system based on multi-criteria measurement, along with a transmission system for data related to the heating process of the connectors contacts as well as degradation of contacting surfaces.

#### КЛАССИФИКАЦИЯ И ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ РАЗЪЕМОВ С ТЕЛЕТРАНСМИССИЕЙ ДАННЫХ

В статье представлен и обсужден способ распределения многопараметральной диагностической системы, базирующей на многокритериальном измерении вместе с системой передачи данных, касающихся процесса нагрева контактов разъемов механизмов, а также деградации поверхностей контактов.