

Ocena funkcjonalności rozłączników napowietrznych próżniowych średniego napięcia o konstrukcji zamkniętej trójbiegunowej, w warunkach off-line

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę funkcjonalności rozłącznika próżniowego średniego napięcia o konstrukcji zamkniętej typu RPZ-24. Zmierzono i zarejestrowano parametry kinematyczne i dynamiczne podczas cykli otwierania O i zamykania C rozłącznika w warunkach off-line. Celem badań było ustalenie wpływu cech konstrukcyjnych biegunów fazowych i napędu na istotne parametry pracy łącznika.

Abstract. The article presents the analysis of the functionality of the medium voltage vacuum switch. The kinematic and dynamic parameters during the switch opening O and closing C cycles in off-line conditions were measured and recorded. The purpose of the research was to determine the influence of design features on the essential switch's parameters (*Functionality evaluation of medium voltage overhead vacuum switch disconnectors with a closed three-pole design, in off-line conditions*).

Słowa kluczowe: rozłącznik, parametry łącznika, dynamika ruchu, diagnostyka.

Keywords: switch, switchgear, parameters, movement's dynamic, diagnostics.

Wstęp

Energetyka zawodowa stawia aparaturze łączeniowej coraz większe wymagania w zakresie parametrów łączeniowych, niezawodności oraz bezobsługowej eksploatacji. Aby sprostać tym wymaganiom niezbędnym jest szczegółowe rozpoznanie mechaniczno-fizycznych procesów zachodzących w aparacie łączeniowym podczas cyklu otwierania O i zamykania C.

Rozpoznanie, pomiary i rejestracje parametrów mechanicznych i fizycznych aparatów łączeniowych średniego napięcia obejmują głównie wyłączniki. Problem monitorowania i diagnozowania mechanicznego wyłączników średniego i wysokiego napięcia został dostrzeżony i podjęty na sesjach CIGRE (fr. Conseil International des Grands Reseaux Electriques) Międzynarodowego Stowarzyszenia Dystrybucji Energii Elektrycznej. Broszury techniczne CIGRE nr 509.2012, 510.2012, 589.2014 przedstawiają raporty i opracowania w tym zakresie [1, 2, 3]. W ramach organizacji IEEE (ang. Institute of Electrical and Electronic Engineers) Transaction on Power Delivery ukazują się publikacje, jeszcze nieliczne, obejmujące zagadnienia monitorowania i diagnostyki urządzeń łączeniowych [7]. Na chwilę obecną jest to problem zauważony bardziej przez specjalistów i ekspertów branży elektroenergetycznej, niż dystrybutorów energii elektrycznej. Należy przypuszczać, że monitorowanie i diagnostyka łączników SN takich jak wyłączniki i reklozery to rozwojowa dziedzina konserwacji predyktywnej urządzeń elektroenergetycznych. Jest to nowy kierunek nadzoru nad eksploatacją sieci elektroenergetycznej.

Aktualny stan wiedzy w tym zakresie przedstawiony został w publikacji dotyczącej integracji nowatorskich czujników i uczenia maszynowego na potrzeby konserwacji predyktywnej w rozdzielnicach średniego napięcia w celu umożliwienia rewolucji w dziedzinie energii i mobilności [5]. Autorzy podkreślili znaczenie konserwacji predyktywnej i opisali rodzaje stosowanych metod.

W publikacji [4] dotyczącej diagnostyki wyłącznika próżniowego określono stan techniczny najważniejszych podzespołów takich jak: zasobnik energii (napęd), układ tłumienia drgań, zespół styków w komorze próżniowej poprzez pomiary sił działających na styki i ich przemieszczenia w poszczególnych biegunach fazowych.

W Polsce pierwsze prace badawcze w zakresie monitorowania i diagnozowania mechanicznego wyłączników próżniowych średniego napięcia obejmujące pomiary i

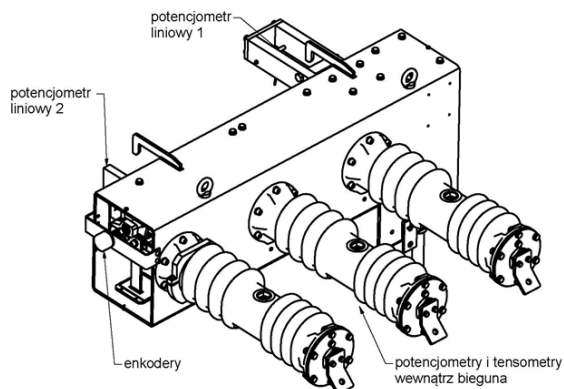
rejestracje położenia i przemieszczeń styków, przemieszczeń kątowych i prędkości wału napędowego przeprowadzono na wewnętrznym wyłączniku próżniowym średniego napięcia. Zmierzono czasy własne i prądy wyzwaczy w cyklach otwierania i zamykania wyłącznika, w warunkach off-line [6]. W publikacji [8] przedstawiono analizę charakterystyk dynamicznych ruchu styków łącznika wysokiego napięcia. Celem badań było ustalenie wpływu cech konstrukcyjnych układu stykowego na jego funkcjonalność.

Wymagania spółek dystrybucyjnych (OSD) w zakresie nowych opracowań rozłączników napowietrznych o konstrukcji zamkniętej z zastosowaniem komór próżniowych przyczyniły się do rozwoju technicznego tych urządzeń. Powstały nowe konstrukcje o parametrach i funkcjonalności bliskich konstrukcjom wyłączników czy reklozerów. Głównym celem pracy badawczej autorów było rozpoznanie, pomiary i rejestracje mechaniczno-fizycznych procesów zachodzących podczas cykli otwierania O i zamykania C w rozłączniku próżniowym średniego napięcia o konstrukcji trójbiegunowej zamkniętej typu RPZ-24 w konfiguracji off-line. Pomiary i rejestracje objęły parametry kinematyczne i dynamiczne rozłącznika. Wyniki uzyskano poprzez cyfrową obróbkę sygnałów liniowych, obrotowych, oporowych (rezystancji) i napięciowych. W trakcie prób wykorzystano pomiary i rejestracje: położenia i prędkości styków, położenia i prędkości kątowych silnika i osi synchronizującej, sił statycznych i dynamicznych na stykach w komorach próżniowych, czasów całkowitych i własnych w cyklach otwierania O i zamykania C, w trybie off-line rozłącznika. Procesem oceny funkcjonalności aparatu objęte były podzespoły: segmenty biegunowe, napęd elektromechaniczny, mechanizmy sprężynowe i oś synchronizująca. Celem pracy było ustalenie wpływu cech konstrukcyjnych aparatu na przebieg ruchu styków i zmiany czasów całkowitych i własnych badanego łącznika.

Stanowisko badawcze

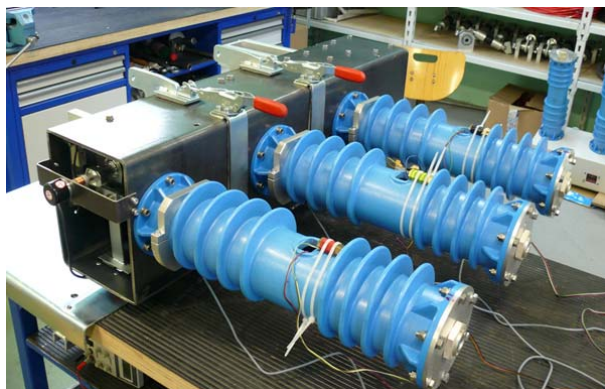
W ramach pracy badawczej wykonano laboratoryjne stanowisko badawcze z rzeczywistym rozłącznikiem w wersji napowietrznej z zespolonym napędem elektromechanicznym typu RPZ-24. Do lokalnego manewrowania aparatem wykonano i zainstalowano rzeczywisty zespół sterowniczy typu SIEN-1.2 z modułem zasilania 24V DC wyposażonym w akumulatory 2x12 V 18 Ah i superkondensatory 32 V 33 F. W ramach pracy zaprojektowano i

zamontowano czujniki pomiarowe tj. potencjometry liniowe, enkodery i tensometry na głównych podzespołach aparatu łączeniowego po przeprowadzeniu kalibracji na maszynie wytrzymałościowej na Politechnice Białostockiej. Na rysunku 1 przedstawiono rozłącznik z napędem. Zaznaczono miejsca instalacji czujników pomiarowych.



Rys. 1. Rozłącznik z napędem typu RPZ-24 z zaznaczonymi miejscami instalacji czujników pomiarowych.

Wszystkie czujniki pomiarowe zainstalowane w rozłączniku RPZ-24 były połączone przewodami z komputerem poprzez wzmacniacze HBM QuantumX MX840A. W czasie prób i pomiarów korzystano ze specjalnego oprogramowania do rejestracji i przetwarzania otrzymanych danych. Na rysunku 2 przedstawiono stanowisko badawcze z podłączonymi czujnikami i sprzętem pomiarowym.



Rys. 2. Stanowisko badawcze rozłącznika RPZ-24

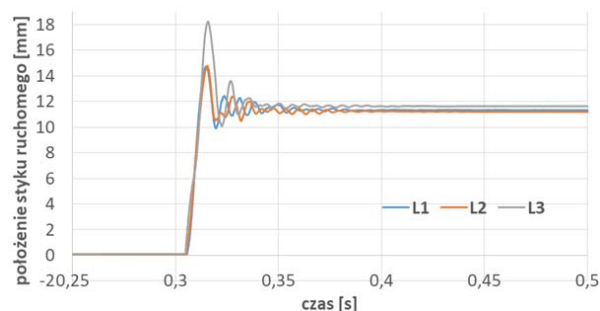
Rodzaje przeprowadzonych prób i pomiarów

Próby i pomiary na zbudowanym stanowisku badawczym zostały przeprowadzone przez specjalistów badawczych z Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej i Instytutu Energetyki – Zakładu Doświadczalnego w Białymstoku. Zmierzono i zarejestrowano wiele danych pozwalających na wyznaczenie położenia, przemieszczeń i prędkości styków, położenia i prędkości wału silnika oraz osi synchronizującej, sił występujących na stykach, czasów całkowitych i własnych podczas cykli zamykania C i otwierania O rozłącznika w trybie pracy aparatu off-line.

Analiza przemieszczeń styków ruchomych w biegunach fazowych rozłącznika

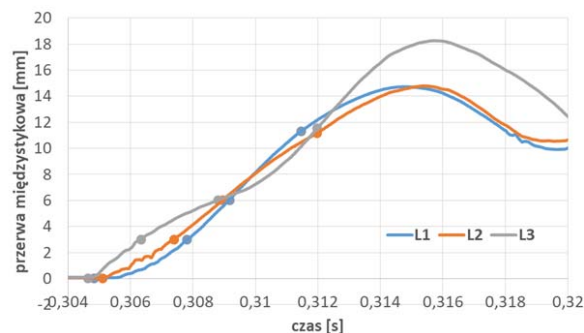
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przebiegi przemieszczeń $s(t)$ styków ruchomych rozłącznika w trzech biegunach fazowych. Na rysunku 3 pokazano drogi styków w czasie cyklu otwierania rozłącznika O. Podczas prób mierzono zmieniające się odległości między stykami stałym i ruchomym. Na podstawie analizy przebiegu wykresu

można stwierdzić, iż ruch styków L1 i L2 był prawidłowy, równoległy względem siebie. Natomiast ruch w biegunie L3 nieco odbiegał od przebiegów L1 i L2. Droga styku ruchomego w L3 była o 3 mm dłuższa od dróg styków w biegunach L1 i L2. Zarejestrowany przebieg dróg otwierania wskazuje na potrzebę regulacji mechanizmu otwierania w biegunie L3.



Rys. 3 Rejestracja przemieszczeń styków ruchomych w cyklu O rozłącznika

Dokładniejszą rejestrację przemieszczeń styków ruchomych podczas cyklu otwierania rozłącznika przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4 Przebiegi dróg $s(t)$ styków ruchomych w cyklu O rozłącznika

Z wykresów rejestracji przebiegu położenia styków ruchomych w poszczególnych fazach podczas cyklu O można odczytać dokładne wartości czasów własnych otwierania na określoną odległość. W tabeli 1 zestawiono czasy otwierania w biegunach L1, L2 i L3 przy przemieszczeniu styków na odległość 3 mm, 6 mm i 11 mm.

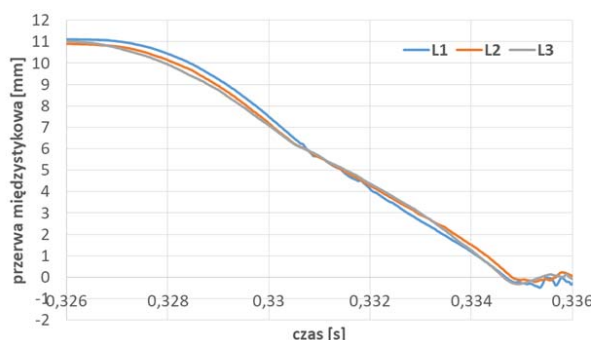
Tabela 1. Czasy własne otwarcia styków w biegunach rozłącznika

Położenie styków	Otwarcie styków na 3 mm	Otwarcie styków na 6 mm	Otwarcie styków na 11 mm
L1 [ms]	3,0	4,3	6,6
L2 [ms]	2,3	3,9	6,9
L3 [ms]	1,7	4,2	7,3

Na podstawie analizy przedstawionych rejestracji i pomiarów można stwierdzić, iż czasy własne otwierania w biegunach rozłącznika RPZ-24 są tak krótkie, jak w nowoczesnych konstrukcjach wyłączników czy reklozerów.

Na wykresie (rys. 5) przedstawiono przebieg dróg styków ruchomych w poszczególnych fazach w czasie cyklu zamykania C rozłącznika typu RPZ-24.

Na podstawie analizy przebiegu rejestracji graficznej $s(t)$ można stwierdzić, iż ruch styków ruchomych w biegunach L1, L2 i L3 jest równoległy względem siebie. Oznacza to równomierne przemieszczenie się w czasie wszystkich trzech styków ruchomych. Na podstawie uzyskanych danych sporządzono zestawienie czasów własnych zamykania styków w trzech punktach na drodze 11 mm (tabela 2).



Rys. 5 Rejestracja przemieszczeń styków ruchomych w cyklu C rozłącznika

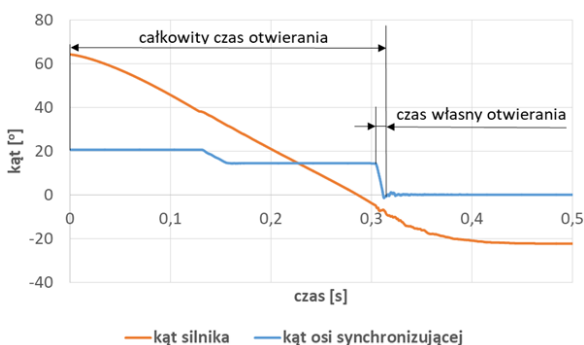
Tabela 2. Czasy własne zamykania styków w biegunach rozłącznika

Położenie styków	Otwarcie styków na 6 mm	Otwarcie styków na 3 mm	Zamknięcie styków na 0 mm
L1 [ms]	4,3	6,3	8,2
L2 [ms]	4,5	6,7	8,6
L3 [ms]	4,7	7,0	8,7

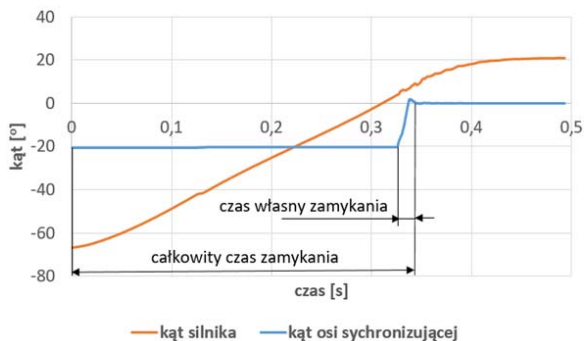
Czasy własne zamykania styków w biegunach rozłącznika RPZ-24 są tak krótkie jak w nowoczesnych konstrukcjach wyłączników czy reklozatorów.

W końcu cyklu zamykania w biegunie L1 zarejestrowano zmiany położenia styku ruchomego. Na tej podstawie stwierdzono konieczność sprawdzenia i regulacji mechanizmu zamykania w biegunie L1.

Prędkości względne styków ruchomych podczas cyklu otwórz O i zamknij C w rozłączniku były bezpośrednio związane z zmianą położenia styków przedstawionych na rysunkach 3, 4, 5. Dokładne rejestracje prędkości styków ruchomych pokazały bardzo dynamiczne zmiany prędkości, i przyspieszeń w czasie cyklu C i O. Styki ruchome w poszczególnych biegunach osiągały maksymalne prędkości względne wynoszące od 3 m/s do 4 m/s.



Rys. 6 Położenie kątowe silnika i osi synchronizującej w czasie cyklu otwierania O rozłącznika



Rys. 7 Położenie kątowe silnika i osi synchronizującej w czasie cyklu zamykania C rozłącznika

Analiza przemieszczeń w mechanizmach napędowych

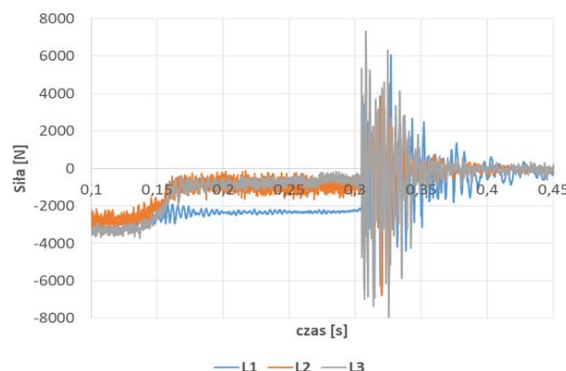
Czasy cykli C i O określono również na podstawie pomiarów ruchu (kąta obrotu) silnika napędowego i osi napędowej synchronizującej. Położenia i przemieszczenia obrotowe tych podzespołów były określone za pomocą zainstalowanych enkoderów MOK40 i MHK40 (rys. 1). Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono zmiany położenia kątowego silnika i osi synchronizującej, podczas cyklu otwierania i zamykania.

Zarejestrowane na przebiegach graficznych czasy własne otwierania i zamykania rozłącznika, mierzone za pomocą enkoderów osiowych wykazały wartości zbliżone do czasów zmierzonych za pomocą potencjometrów liniowych. Czas własny otwierania wynosił ok. 7 ms, a czas własny zamykania ok. 8,5 ms. Czasy całkowite trwania cykli były rejestrowane od momentu rozpoczęcia ruchu silnika aż do końca ruchu osi synchronizującej. Czas całkowity cyklu otwierania O wynosił 0,31 s, cyklu zamykania C – 0,34 s. Uzyskane tak krótkie czasy cykli C i O pozwalają na zastosowanie rozłącznika w automatyce SPZ w pierwszej przerwie trwającej 0,5 s.

Analiza sił występujących w mechanizmach rozłącznika

Pomiary i rejestracje sił występujących w mechanizmach rozłącznika w czasie cykli C i O ograniczono do pomiarów i rejestracji sił statycznych i dynamicznych występujących na stykach komór próżniowych, ze względu na najistotniejsze miejsce ich występowania. Pomiary wykonano za pomocą tensometrów umieszczonych w biegunach, między komorą próżniową, a izolatorem wewnętrznym (rys. 1). Na rysunku 8 przedstawiono przebieg sił występujących na stykach komór próżniowych w trzech biegunach, w czasie całkowitym cyklu otwierania O.

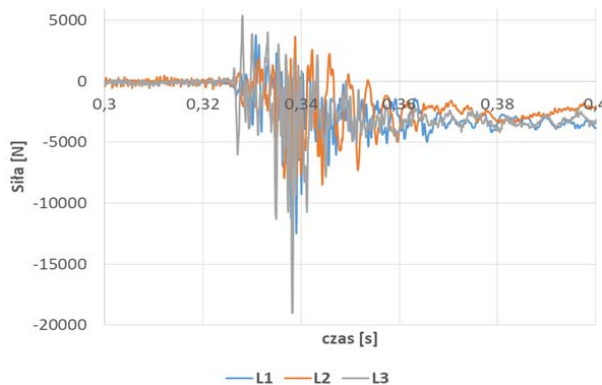
Siły występujące na zamkniętych stykach komór próżniowych w fazie startowej napędu w trzech biegunach wyniosły od 2,5 kN do 3,5 kN. Po rozpoczęciu ruchu otwierania mechanizmu sprężynowego, zmniejszył się docisk na stykach. Wartości sił zmalały do ok. 900 N w biegunie L2 i L3 oraz do ok. 2200 N w biegunie L1, w przedziale czasowym od 0,17 s do 0,3 s. Zwiększona wartość siły w biegunie L1 wskazywała na konieczność regulacji mechanizmu otwierania w L1. Wartości sił dynamicznych w momencie otwarcia, w czasie własnym w trzech biegunach były wyrównane i wyniosły maksymalnie ok. 6 kN. Po pełnym otwarciu i ustaniu drgań wartości sił zmalały do 0.



Rys. 8 Siły na stykach komór próżniowych w czasie cyklu otwierania O.

Na rysunku 9 przedstawiono przebieg sił występujących na stykach komór próżniowych w trzech biegunach, w czasie całkowitym cyklu zamykania C. W momencie rozpoczęcia ruchu zamykania, wartości sił na stykach

wynosiły 0. W momencie zetknięcia się styków ruchomych ze stykami stałymi, wartości sił dynamicznych wyniosły w trzech biegunach ok. 5 kN. W biegunie L3 wystąpiło zjawisko odbicia styku w czasie ok. 1 ms. z siłą 19 kN.



Rys. 9 Siły na stykach komór próżniowych w czasie cyklu zamykania C

Zwiększona wartość siły odbicia wskazuje na konieczność regulacji mechanizmu zamykania w L3. Po ustaleniu pozycji zamknięcia w trzech biegunach, wartości sił statycznych dociskających styki w komorach próżniowych wyniosły od 2,5 kN do 3,5 kN.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych prób i pomiarów rozłączników napowietrznych średniego napięcia o konstrukcji zamkniętej trójbiegunowej w warunkach off-line uzyskano dodatkową wiedzę niezbędną przy ocenie funkcjonalności rozłącznika i jego podzespołów. Otrzymano szereg informacji z zakresu działania mechaniki rozłącznika RPZ-24. W wyniku pomiarów i analiz wyznaczono prędkości kątowne i obrotowe mechanizmów otwierających i zamykających styki, mechanizmu osi synchronizującej i osi silnika napędowego. Na podstawie uzyskanych danych oceniono aktualny stan techniczny mechanizmów w trzech biegunach.

Rejestracje graficzne przemieszczeń styków ruchomych – przebiegi dróg $s(t)$ w biegunach fazowych L1, L2 i L3 podczas cykli otwierania O i zamykania C pozwoliły na dokładne wyznaczenie czasów całkowitych i czasów własnych. W tabeli 2 podane zostały czasy własne

zamykania styków przy ich położeniach: 6 mm, 3 mm, 0 mm. W tabeli 1 podane zostały czasy własne otwierania styków przy ich położeniach: 3 mm, 6 mm, 11 mm.

Dokładne rejestracje prędkości względnych styków ruchomych pokazały bardzo dynamiczne zmiany prędkości i przyspieszeń w czasie cykli C-O. Określono maksymalne prędkości względne styków ruchomych w poszczególnych biegunach.

Czasy całkowite cykli C i O określono również na podstawie pomiarów kątów obrotu silnika napędowego i osi napędowej synchronizującej. Zarejestrowane i zmierzone za pomocą enkoderów osiowych zmiany w cyklach położenia kątowych wykazały wartości czasów zbliżone do czasów zmierzonych za pomocą potencjometrów liniowych.

Pomiary i rejestracje sił występujących w mechanizmach rozłącznika sprowadzono do pomiarów i rejestracji sił statycznych i dynamicznych na stykach komór próżniowych w biegunach L1, L2 i L3. Określono wartości sił w czasie cyklu otwierania i zamykania, w fazie startowej, po rozpoczęciu i po zakończeniu ruchu mechanizmów.

W oparciu o wyniki pomiarów i rejestracje graficzne opisanych właściwości i parametrów rozłączników o konstrukcji trójbiegunowej zamkniętej można ocenić wpływ cech konstrukcyjnych biegunów fazowych i napędu na

istotne parametry pracy łącznika. Uzyskane dane były podobne lub różniły się nieco w poszczególnych biegunach. Wyniki pracy badawczej wskazały mechanizmy rozłącznika, w których wystąpiły różnice w pomiarach i rejestracjach. W niektórych przypadkach przebiegi dróg $s(t)$ styków ruchomych w cyklach O w biegunach L1 i L2 były jednakowe, a nieznaczne odchylenie nastąpiło w biegunie L3. Przebiegi dróg $s(t)$ w cyklach C, w biegunach L2 i L3 były jednakowe, a odchylenie nastąpiło w biegunie L1. Na tej podstawie należy wywnioskować, że mechanizmy otwierania i zamykania L3 i L1 wymagają sprawdzenia i ponownej regulacji. Podobne wnioski należy wyciągnąć w przypadku pomiarów sił na stykach komór próżniowych. Nastąpiły nieznaczne zmiany wartości sił w biegunach L1 i L3. Pomiary i rejestracje jednoznacznie pokazały konieczność poprawy pracy tych mechanizmów.

Wpływ cech konstrukcyjnych podzespołów rozłącznika takich jak: segmenty biegunowe, napęd elektromechaniczny, zespół sterowniczy z modułem zasilania, oś synchronizująca, oś napędowa, wskaźniki położenia styków na funkcjonalności pracy aparatu był jednoznacznie pozytywny. Jedynie regulacji wymagały mechanizmy sprzężynowe w biegunach L1 i L3.

Podsumowując zgromadzoną wiedzę uzyskaną w pracy badawczej, diagnozowanie i monitorowanie stanu aparatu łączeniowego będzie dobrym narzędziem do poprawy jakości, niezawodności łączników i stanu sieci elektroenergetycznych. W badanym aparacie zainstalowano w sumie 10 różnych czujników pomiarowych, za pomocą których określono kilka metod badawczych. Połączenie co najmniej dwóch metod powinno dostarczyć wielu danych pozwalających na ocenę stanu urządzenia.

Autorzy: dr inż. Stanisław Kiszło, Instytut Energetyki – Zakład Doświadczalny w Białymstoku, ul. św. Rocha 16, 15-879 Białystok, e-mail: s.kiszlo@iezd.pl; mgr inż. Michał Szymański, Instytut Energetyki – Zakład Doświadczalny w Białymstoku, ul. św. Rocha 16, 15-879 Białystok, e-mail: m.szymanski@iezd.pl.

LITERATURA

- [1] CIGRE Technical Brochure 509.2012 Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of the High Voltage Equipment Part 1 – Summary and General Matters.
- [2] CIGRE Technical Brochure 510.2012 Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of the High Voltage Equipment Part 2 – Reliability of the High Voltage Circuit Breakers.
- [3] CIGRE Technical Brochure 589.2014 The Impact of the Application of Vacuum Switchgear at Transmission Voltages.
- [4] Jianzhong T., Shisong L., Jingwei X., Zhengmin C., Contact Force Monitoring and Its Application in Vacuum Circuit Breakers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 5, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2423686.
- [5] Hoffmann M., Wildermuth S., Gitzel R., Boyaci A., Gebhardt J., Kaul H., Amihai I., Forg B., Integration of Novel Sensors and Machine Learning for Predictive Maintenance in Medium Voltage Switchgear to Enable the Energy and Mobility Revolutions, *Sensors for Societal Automation*, 08.04.2020, doi: 10.3390/s20072099.
- [6] Pochanke Z., Chmielak W., Monitorowanie i diagnozowanie mechaniczne wyłączników próżniowych średniego napięcia – problemy i rozwiązania, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 09/2018, doi: 10.15199/74.2018.9.3.
- [7] Stoczko Sz., Szewczyk M., Przegląd aktualnych kierunków badań w zakresie łącznikowej techniki próżniowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2 (2021), doi: 10.15199/48.2021.02.35.
- [8] Berczyński R., Kulas S., Diagnozowanie dynamiki ruchu styków łączników elektrycznych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2016), doi: 10.15199/48.2016.01.06.