

doi:10.15199/48.2016.01.06

## Diagnostowanie dynamiki ruchu styków łączników elektrycznych wysokiego napięcia

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę charakterystyk dynamicznych ruchu styków podczas zamykania szybkiego łącznika wysokiego napięcia. Celem badań było ustalenie wpływu istotnych cech konstrukcyjnych układu stykowego załącznika zwarciovego, na stan jego zdolności funkcjonalnej. Przedstawione zostały dane pomiarowe oraz ich analiza.

**Abstract.** The article presents an analysis of the dynamic characteristics of contacts movement during closing fast high-voltage switch. The aim of this study was to determine the effects of significant design features of switch contact system on the state of his functional fitness. The study used specialized measurement laboratory. Measurement data and their analysis were presented. (**Diagnosing the dynamics of contacts movement of high-voltage electrical switches**).

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, dynamika ruchu, łączniki elektryczne,

**Keywords:** diagnostics, movements dynamic, electrical switches

### Wstęp

Udział łączników wysokiego napięcia w ogólnej statystyce uszkodzeń urządzeń elektroenergetycznych jest znaczący a jednocześnie ważny z uwagi na istotne znaczenie spełnianych przez nie funkcji w systemie elektroenergetycznym. Badania diagnostyczne łączników elektrycznych dotyczą przede wszystkim: stanu torów prądowych i układów stykowych, mechanizmów napędowych i układów izolacyjnych.

W procesie załączania prądu w obwodach z łącznikami elektrycznymi przed metalicznym zetknięciem się styków, ma na ogół miejsce zapłon łuku elektrycznego. Następuje to w wyniku przebicia przerwy między stykowej łącznika. Aby ograniczyć skutki cieplne palącego się łuku w przestrzeni między stykowej, dąży się do skracania czasu łukowego załączania [1, 2].

Badania diagnostyczne charakterystyk dynamicznych ruchu styków łączników elektrycznych wysokiego napięcia służą sprawdzeniu stopnia zdolności do spełniania wymagań eksploatacyjnych. Dokonuje się tych badań głównie drogą porównywania charakterystyk wyznaczanych doświadczalnie na istniejących łącznikach z wynikami uzyskanymi w ramach wcześniej przeprowadzanych badań pełnych lub niepełnych. W artykule podkreślono użyteczność stosowania tych metod pomiarowych w eksploatacji łączników elektrycznych.

### Cel pracy

Przedmiotem analizy dynamiki ruchu styków jest wyznaczenie przebiegów prędkości i przyspieszeń styków ruchomych przed ich zderzeniem się. Celem jest ustalenie wpływu wartości cech konstrukcyjnych układu stykowego na przebieg ruchu styków oraz na zmiany czasu własnego badanego łącznika w zależności od parametrów konstrukcyjnych.

### Analiza dynamiki ruchu styków

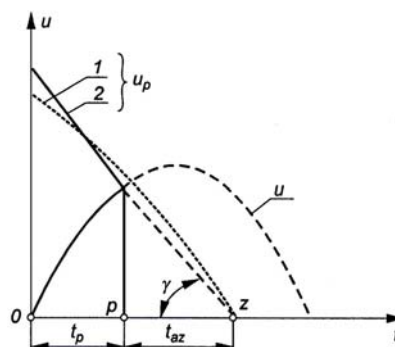
W łącznikach elektrycznych przemieszczenie się styków ruchomych odbywa się z użyciem mniej lub bardziej rozbudowanego mechanizmu napędowego. Istotne jest przy tym uzyskanie przez styki ruchome odpowiedniej prędkości w chwili zetknięcia się ze stykami nieruchomymi.

W trakcie przemieszczania się styków ruchomych, oprócz sił układu napędowego, pojawiają się siły bezwładności (momenty) styków ruchomych, siły tarcia w prowadnicach styku ruchomego oraz siły oporu zamka, umożliwiające ruch styków. Znaczne przyspieszenia

uzyskiwane przez styki ruchome podczas ich przemieszczania decydują o wartościach sił i momentów bezwładności, działających na styki oraz inne ogniwa ruchome mechanizmu. Mają więc bezpośredni wpływ na dynamikę ruchu styków i obciążenie napędu łącznika.

W procesie załączania prądu w obwodach z łącznikami elektrycznymi, przed metalicznym zetknięciem się styków, ma na ogół miejsce zapłon łuku elektrycznego. Następuje to w wyniku przebicia przerwy między stykowej łącznika. Aby ograniczyć skutki cieplne palącego się łuku w przestrzeni między stykowej, dąży się do skracania czasu łukowego załączania. Szczególnie jest to istotne podczas załączania i wyłączania transformatorów nieobciążonych, baterii kondensatorów, ale także nie obciążonych linii długich czy dławików równoległych [1, 4, 5]. Wartości powstających wówczas przetężeń oraz przepięć o znacznych wartościach i stromościach, mogą być niebezpieczne dla łączonych odbiorników jak i dla samego wyłącznika. Zjawiska te są przyczyną szybszego zużycia się układów stykowych, gaszeniowych wyłączników, jak również osłabienia a nawet przebicia izolacji łączonych obwodów elektroenergetycznych [3].

Podczas załączania obwodu prądu przemiennego, sygnał na stykach łącznika elektrycznego na ogół nie jest skorelowany z fazą napięcia, stąd przebicie między stykami może następować przy różnej ich odległości i w różnych chwilach, tj. przy różnych kątach fazowych napięcia. Czas łukowy załączania może być przy tym, przy każdym załączeniu prądu inny.



Rys.1. Graficzne wyznaczenie czasu przedłukowego  $t_p$  i łukowego  $t_{az}$  podczas załączania prądu [4]

W założeniu, że napięcie przebicia jest proporcjonalne do odległości między stykami oraz że nie zależy od

biegunowości styków, można wyznaczyć chwilę  $t_p$ , w której następuje przebiecie podczas załączania prądu przy napięciu  $u = U_m \sin \omega t$  (rys. 1).

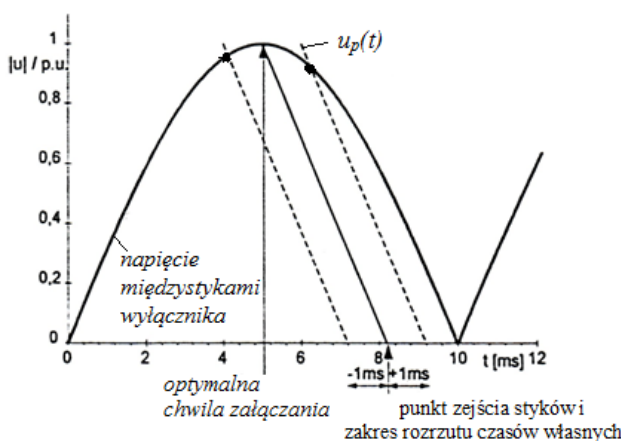
Przebiecie przerwy między stykowej występuje w chwili zrównania się wartości wytrzymałości dielektrycznej przerwy między stykowej  $u_p(t)$  z chwilową wartością przyłożonego do przerwy napięcia  $u(t)$ , (rys. 1). Czas łukowy załączania  $t_{az}$ , jest zależny od prędkości schodzenia się styków  $V_s$ , oraz od wartości natężenia pola elektrycznego  $E_k$  [1, 5], w obszarze stykowym.

Aby zatem można było załączyć prąd w obwodzie w chwili przejścia napięcia przez wartość zerową i uniknąć przebiecia przerwy między stykowej podczas załączania, praktycznie dwa warunki powinny być spełnione [3, 4, 5]:

1. Dynamiczna wytrzymałość przerwy między stykowej podczas zamykania styków łącznika powinna być wyższa od chwilowej wartości napięcia zasilania,
2. Rozrzut czasów własnych łącznika elektrycznego  $t_c = t_p + t_{az}$ , powinien być jak najmniejszy; dla załączników zwarciovych wartość rozrzutu należy uznać za satysfakcjonującą jeśli:

$$(1) \quad \Delta t_c \leq 5^0 \text{ el}$$

Aby ograniczyć przetężenia prądowe występujące podczas załączania transformatorów nieobciążonych należy dokonywać załączenia obwodu przy przejściu napięcia zasilania przez wartość maksymalną (rys. 2).



Rys.2. Optymalna chwila załączania transformatora nieobciążonego w maksimum napięcia; za 1 przyjęto napięcie znamionowe zasilania.

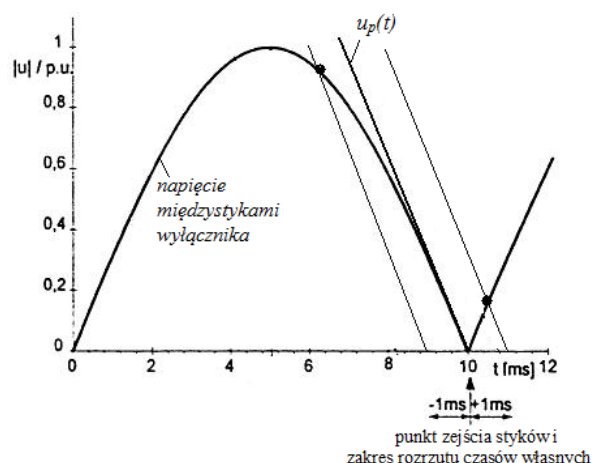
Rozrzut czasów własnych łącznika elektrycznego  $\Delta t_c = t_p + t_{az}$ , powinien być jak najmniejszy; dla wyłączników wysokiego napięcia dopuszcza się rozrzuty  $\Delta t_c \leq \pm 1 \text{ ms}$  [6]. Różnice pomiędzy wartością maksymalną napięcia, a wartościami wyznaczonymi dla przyjętych czasów rozrzutów wynoszą odpowiednio – 0,05 i 0,11 wartości maksymalnej napięcia na przerwie między stykowej wyłącznika.

Przy załączaniu baterii kondensatorów największe korzyści uzyskuje się podczas załączania baterii w zerze napięcia zasilającego. Załączanie w zerze napięcia wymaga jednak zapewnienia przebiegu zmniejszania się wytrzymałości przerwy między stykowej wyłącznika co najmniej styczego do pół fali napięcia przechodzącej przez wartość zerową (rys. 3). Powinien być zatem spełniony warunek:

$$(2) \quad V = \frac{\omega U_m}{n E_k}$$

gdzie:

$V$  - minimalną wartość prędkości styków w chwili mechanicznego ich zetknięcia się;  $E_k$  – wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje przebiecie;  $n$  – liczba przerw w biegunie.



Rys.3. Optymalna chwila załączania baterii kondensatorów w zerze napięcia

Na rys. 3, przedstawiony jest rezultat wystąpienia rozrzutów czasów własnych wyłącznika w założonych granicach  $\Delta t_c \leq \pm 1 \text{ ms}$ . Z punktu widzenia występujących przy załączaniu przetężeń prądowych, opóźnione załączenie prądu w obwodzie w stosunku do przejścia napięcia przez wartość zerową jest korzystniejszym rozwiązaniem [6].

Ogólnie biorąc, im większa jest wartość prędkości  $V_s$  schodzenia się styków łącznika elektrycznego, tym krótszy jest czas własny łącznika. W rezultacie krótszy czas palenia się łuku elektrycznego wpływa na większą trwałość łączników elektrycznych.

### Stanowisko pomiarowe do badań łącznika

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi następujące elementy:

- badany szybki łącznik zwarciovych,
- stycznik załączający elektromagnes garnkowy, dzięki któremu zrealizowane jest elektryczne otwieranie styków łącznika poprzez wypchnięcie trzpienia osiowego,
- dwa przyciski klawiszowe, odpowiadające za załączenie wyzwolenia zamknięcia styków łącznika (podanie napięcia na cewki wyzwalaające) oraz za otwarcie styków łącznika (podanie napięcia zasilającego na stycznik, który załącza elektromagnes garnkowy),
- akcelerometr z wyjściem napięciowym, umieszczony na przedłużeniu trzpienia osiowego, gdzie wartość napięcia wyjściowego jest proporcjonalna do wartości przyspieszenia podczas ruchu styków,
- układ zasilania (bateria) akcelerometru i zespół gniazd pomiarowych
- transformator włączony w obwód cewek wyzwalaających, na wyjściu którego pojawia sygnał napięciowy, którego zbocze narastające odpowiada momentowi podania napięcia na cewki wyzwalaające,
- obwód probierczy na stykach łącznika, dzięki któremu możliwy jest pomiar napięcia bezpośrednio na stykach
- płyta bakelitowa, stanowiąca podstawę mechaniczną całej konstrukcji.

Wyniki pomiarów w postaci charakterystyk napięcia w funkcji czasu (dla każdego z wyzwoleń łącznika) uzyskiwane są za pomocą cyfrowego wielokanałowego oscyloskopu z możliwością rejestracji danych. Źródłem wyzwolenia podstawy czasu oscyloskopu jest sygnał napięciowy na wyjściu transformatora znajdującego się w

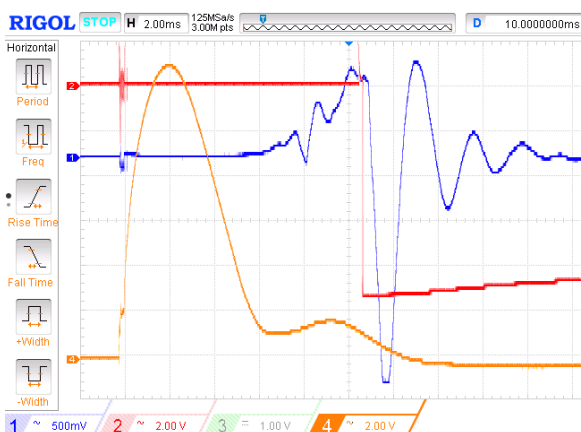
obwodzie cewek wyzwalających. Sygnały napięciowe wyprowadzone zostały na panelu zawierającym gniazda BNC w celu wygodnego podłączenia do przyrządów pomiarowych. Na rysunku 4. przedstawione jest zdjęcie stanowiska (bez oscyloskopu).



Rys.4. Stanowisko pomiarowe

### Wyniki pomiarów

Na oscylogramach (rys. 5) uzyskiwany jest wyraźny moment czasu w którym następuje podanie napięcia na cewki wyzwalające (przebieg ciemnoniebieski, kanał 4 oscyloskopu) oraz równie wyraźny moment zetknięcia styków w postaci zbocza opadającego sygnału napięciowego ze styków łącznika (przebieg błękitny, kanał 2 oscyloskopu).



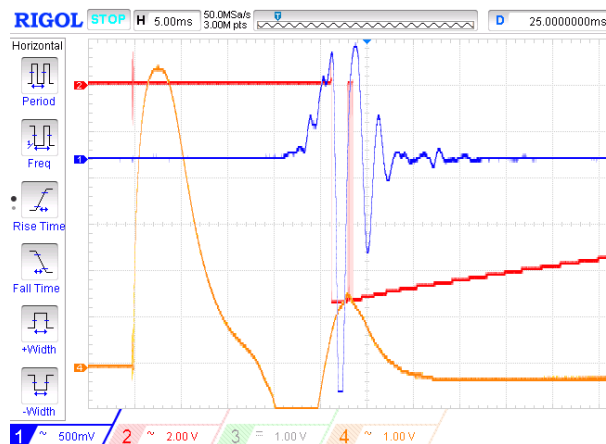
Rys.5. Oscylogram dla jednego z pomiarów

Szczegółnej uwagi wymaga analiza przebiegu przyspieszenia (przebieg żółty, kanał 1 oscyloskopu), otóż widoczne są dwa maksima. Czas pierwszego z nich określa moment zatrzymania się styków podczas ruchu, drugie maksimów oraz następujące po nim zafalowania są to drgania układu połączonych ze sobą styków nieruchomych i styku ruchomego. Dolina pomiędzy maksimami wyznacza hamowanie całego układu. Charakterystyczne zafalowania przebiegu, jeszcze przed wystąpieniem pierwszego maksima lokalnego świadczą o docieraniu się układu mechanicznego styków, występujące opory ruchu powodują lokalne hamowanie układu przesuwanego trzpienia, wychwytywanie takich stanów jest szczególnie ważne podczas diagnostyki łącznika.

Po scałkowaniu przebiegu przyspieszenia uzyskiwana jest charakterystyka prędkości w funkcji zamykania styków łącznika. Ta charakterystyka pozwala określić punkty charakterystyczne w czasie, takie jak prędkość hamowania i prędkość w momencie zwarcia styków. Wartość prędkości w momencie zwarcia styków musi być dostosowane do

wartości napięcia zasilającego w torze prądowym załączanym przez łącznik, w celu wyeliminowania bądź ograniczenia występującego łuku elektrycznego.

Najciekawszym z badawczo-diagnostycznego punktu widzenia jest zaobserwowanie zjawiska odskoku styków łącznika. Odskok styków mimo iż występuje statystycznie rzadko jest zjawiskiem wliczone niepożądanym. Zjawisko to jest przedstawione na rysunku 6.



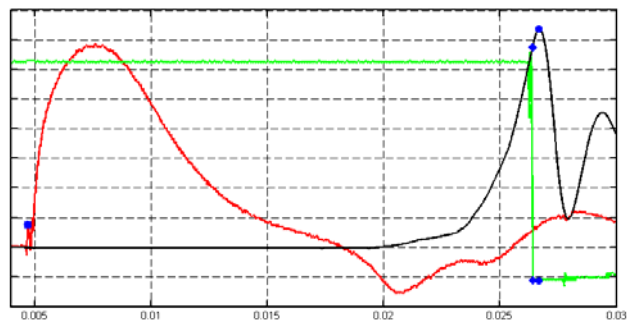
Rys.6. Oscylogram dla pomiaru z odskokiem

### Metody określania czasu własnego łącznika

Pierwszą metodą określania czasu własnego łącznika jest zdefiniowanie go jako odcinek czasu między momentem podania napięcia sterującego na cewki wyzwalające a momentem kiedy styki zostaną zwarte w stanie swojej pełnej styczności. Na przebiegu napięcia ze styków, jest to punkt o minimalnej wartości.

Drugą metodą jest przyjęcie jako momentu zwarcia styków, momentu kiedy styki łącznika uzyskują maksymalną swoją prędkość.

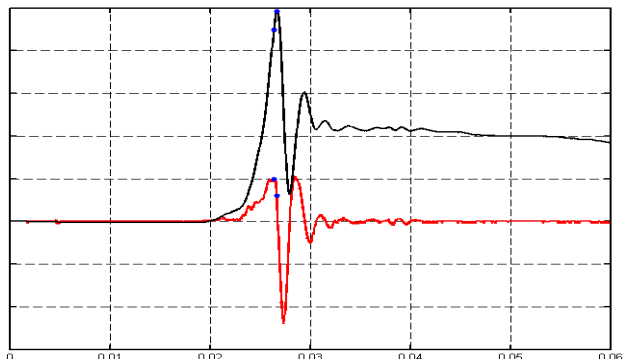
Na rysunku 7 przedstawione są charakterystyczne punkty czasowe do wyznaczenia czasu własnego dwoma powyższymi metodami (niebieskie punkty), na tle przebiegów: napięcia z przekładnika cewek wyzwalających (przebieg czerwony), napięcia ze styków łącznika (przebieg zielony), wyznaczonej prędkości styków (przebieg czarny) na podstawie scałkowanego napięcia z akcelerometru. Jak widać z rysunku, punkt ustalony jako jednoznaczne zetknięcie się styków łącznika (pierwsza od lewej niebieska kropka na zielonym przebiegu) nie pokrywa się z maksimum prędkości styków (druga niebieska kropka od lewej na czarnym przebiegu). Wynika to z faktu, iż po zetknięciu się styków łącznika, zespół połączonych styków ruchomych i nieruchomych zachowuje jeszcze przez ułamek czasu swoją energię kinetyczną, przez co jeszcze przez ten ułamek czasu przyspiesza.



Rys.7. Punkty charakterystyczne (przebiegi przeskalowane w osi Y)

## Analiza przeprowadzonych badań dynamiki ruchu

Na rysunku 8 przedstawiony jest przebieg przyspieszenia (kolorem czerwonym) z jednego przykładowego pomiaru oraz odpowiadający mu przebieg prędkości (kolorem czarnym), uzyskany po scałkowaniu przebiegu napięcia z akcelerometru. Oznaczono również punkty charakterystyczne, dotyczące wyznaczania czasu własnego łącznika (patrz opis rysunku 7).



Rys.8. Przebiegi prędkości i przyspieszenia (przebiegi przeskalowane w osi Y)

Tabela 1. przedstawia zestawienie wartości średniej czasów własnych z 20 wyzwoleń łącznika, wyznaczonych wyżej wymienionymi metodami dla kilku różnych napięć zasilających cewki wyzwalające, wraz z określeniem rozrzutu tego czasu wyznaczonym na podstawie metodyki opisanej w [2].

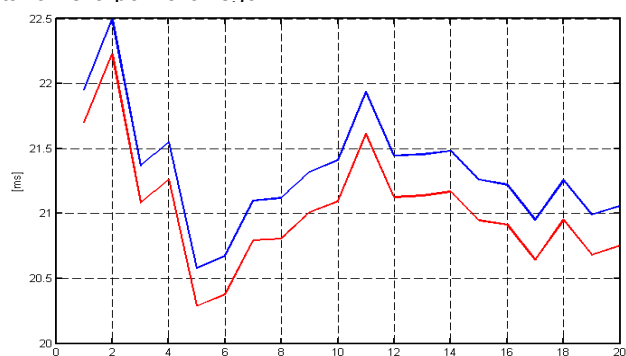
Tabela 1. Wyniki obliczeń

Napięcie cewek [DC]	Metoda I		Metoda II	
	Czas własny [ms]	Rozrzut czasu własnego [ms]	Czas własny [ms]	Rozrzut czasu własnego [ms]
100V	16,42	0,918	16,83	0,916
110V	20,75	1,459	21,06	1,460
165V	13,02	0,781	13,49	0,761
220V	12,97	0,389	13,35	0,393
250V	9,78	0,500	10,32	0,498

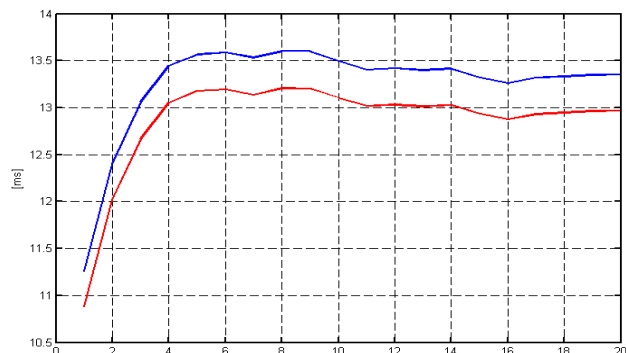
Napięcie zasilania cewek wyzwalających ma duży wpływ na wartość czasu własnego łącznika, który powinien być dla danej konstrukcji jak najmniejszy. Z wyliczonych wartości w tabeli jasno wynika, iż czas ten skraca się jeżeli cewki wyzwalające łącznika zasilane są wyższym napięciem. Dalsze podnoszenie napięcia zasilającego cewki wyzwalającego uzależnione jest od konkretnego systemu energetycznego w jakim ma dany łącznik pracować. Wyższe wartości napięć mogą nie być dostępne w systemie bądź układ łącznika może być nie dostosowany do takich wartości.

Zastanawiać może czemu czas własny łącznika dla napięcia 110V nie trzyma się tendencji opisanej wyżej. Otóż wynika to z faktu, iż pomiary dla tej wartości napięcia zasilającego cewki wyzwalające były wykonywane jako pierwsze, następnie dla napięcia 220V, a dopiero w drugiej turze pomiarów pomiary dla 100V, 165V i 250V. Takie wyniki obliczeń czasów własnych, dla takiej kolejności napięć wskazują na „docieranie się” układu mechanicznego łącznika po kolejnych kilkudziesięciu wykonanych jego wyzwoleniach załączenia. Takie „docieranie się” ma istotny wpływ na pracę łącznika. W związku z powyższym, jednoznaczne stwierdzenie ile podwyższać napięcie cewek zasilających jest nie do końca możliwe i jasne. Wskazane jest przy dalszej diagnostyce wykonanie kilkudziesięciu „ślepych wyzwoleń” przed kolejnymi seriami pomiarów i po takim „wygrzaniu” układu powtórne określenie tendencji

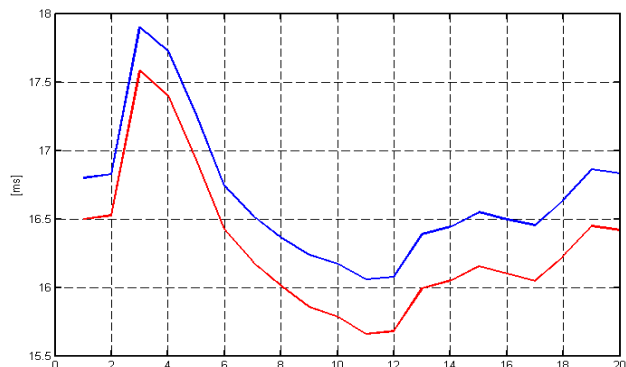
zmian czasów własnych łącznika przy zmianach napięcia cewek wyzwalających. Należy nadmienić dodatkowo iż są to wyniki dla tego konkretnego łącznika, konkretnego stanowiska pomiarowego.



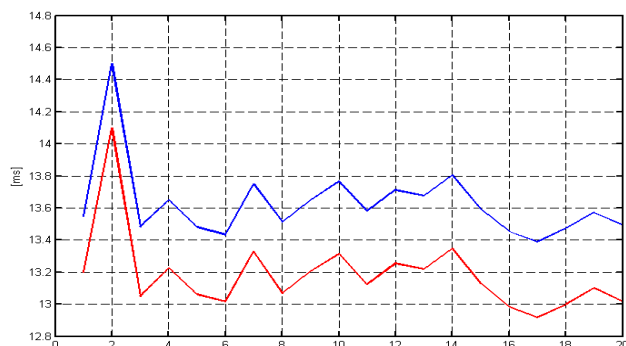
Rys.9. Przebiegi dla  $U_w = 110V$



Rys.10. Przebiegi dla  $U_w = 220V$



Rys.11. Przebiegi dla  $U_w = 100V$

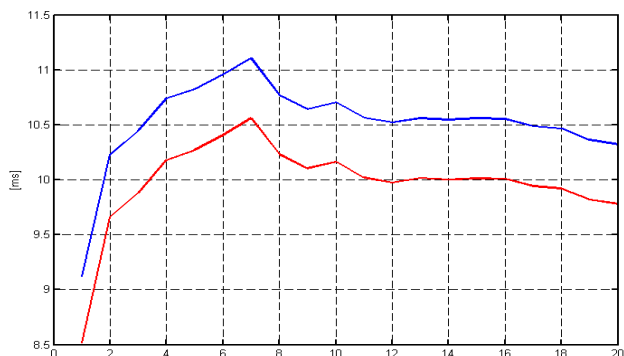


Rys.12. Przebiegi dla  $U_w = 165V$

Na kolejnych rysunkach przedstawione są przebiegi wartości średnich z czasów własnych po kolejnych wyzwoleniach, dla każdego z napięć zasilających cewki wyzwalające. Rysunki te przedstawione zostały w takiej kolejności w jakiej wykonywane zostały pomiary: 110V,



220V, 100V, 165V, 250V, dla obu metod określania czasu własnego łącznika (na czerwono pierwsza, na niebiesko druga).



Rys.13. Przebiegi dla  $U_w = 250V$

Całościowe spojrzenie na takie zestawienia pozwala na zaobserwowanie wspomnianego wcześniej docierania się układu mechanicznego zarówno dla wszystkich pomiarów, jak i dla każdej z serii napięciowej. Dodatkowo z analizy przebiegów wynika, iż nie wskazane jest zwiększanie liczby wyzwoleń w próbie (20 razy), gdyż nie poprawia to w znacznej mierze tendencji ustalania się wartości (średniej) czasu własnego łącznika, najlepiej widoczne jest na przebiegu dla napięcia 220V.

#### Podsumowanie

W procesie zamykania styków łącznika elektrycznego dąży się do skracania czasu łukowego załączania, w celu ograniczenia energii tego łuku i co za tym idzie, zwiększeniu żywotności łącznika.

Ważną rolę w dynamice ruchu styków odgrywa siła oporu zamka podczas ruchu styków oraz wartość napięcia przyłożonego do uzwojenia magnesu spolaryzowanego (napięcie cewek wyzwalających), w celu skompensowania siły przyciągania zwory zamka przez pole magnetyczne

magnesu. Jednakże zwiększanie tego napięcia powyżej pewnej technologicznej granicy jest niecelowe.

Podobnie niecelowe okazuje się zwiększanie liczby wyzwoleń łącznika w jednej próbie badawczej.

Faza załączania prądu w obwodzie elektrycznym, prędkość schodzenia się styków wyłącznika oraz rozrzuty czasów własnych jego działania mają istotny wpływ na przetężenia i przepięcia w załączanym obwodzie.

Zjawisko docierania się układu mechanicznego łącznika ma ogromny wpływ na pracę i diagnozowanie łącznika zwarcowego.

**Autorzy:** mgr inż. Robert Berczyński, E-mail: robert.berczynski@wat.edu.pl, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa;  
prof. dr hab. inż. Stanisław Jan Kulas, E-mail: stanislaw.kulas@wat.edu.pl, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

#### LITERATURA

- [1] Ciok Z., *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa, 1976
- [2] Kolimas Ł. Kulas S. Piskała M. Zgliński K., *Laboratorium obciążalności torów wieloprądowych I zestyków*, OWPW, Warszawa, 2014
- [3] Kulas S., *Analiza i elementy syntezy wieloprądowych układów stykowych łączników elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2002.
- [4] Kulas S. Supronowicz H., *Analiza procesu załączania prądu łącznikami elektrycznymi zestykowymi w układach kompensacji mocy biernej*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 12, Katowice, 2013.
- [5] Maksymiuk J., *Aparaty elektryczne II Podstawy eksploatacji*, INPE z. 34, Warszawa, 2011
- [6] Ware B. Reckleff J. Mauthe G. Schett G., *Synchronous switching of power systems*, CIGRE Session Report No. 13-205, 1990.