

Badanie dynamiki ruchu styków załącznika zwarcowego

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę charakterystyk dynamicznych ruchu styku ruchomego podczas zamykania szybkiego łącznika wysokiego napięcia, przy zastosowaniu technik poprawy pracy łącznika. Celem badań było ustalenie wpływu istotnych cech konstrukcyjnych układu stykowego załącznika zwarcowego, na proces niejednoczesności łączenia styków oraz na wartość czasu zamykania łącznika. Przedstawione zostały dane pomiarowe oraz ich analiza.

Abstract. The article presents an analysis of the dynamic characteristics of moving contact during closing fast high-voltage switch using techniques to improving the work of switch. The aim of this study was to determine the effects of significant design features of switch contact system on the process of non-simultaneous contacts junction and on value of scatter closing time of switch. The study used specialized measurement laboratory. Measurement data and their analysis were presented. (**Analysis of the movement dynamics of contacts and contact- set of the making switches**).

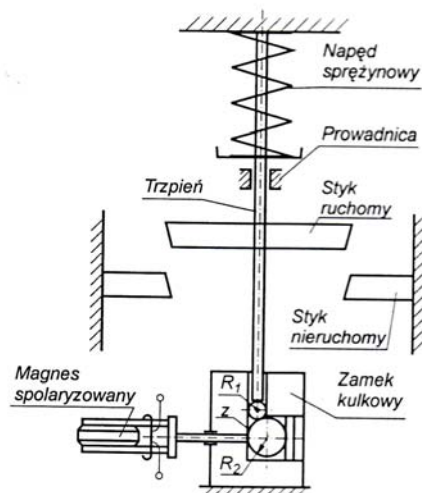
Słowa kluczowe: diagnostyka, dynamika ruchu, łączniki elektryczne, drgania

Keywords: diagnostics, movements dynamic, electrical switches, vibrations

Wstęp

W czasie procesu załączania dużych prądów, zwłaszcza prądów zwarcowych, łącznikami zestykowymi (mechanizmowymi), styki łącznika elektrycznego intensywnie się nagrzewają. Jest to spowodowane zapłonem łuku elektrycznego występującym przed metalicznym zetknięciem się styków, w następstwie ewentualnego pojawienia się odskoków styków po ich zderzeniu, a także w wyniku niejednoczesności zamykania się poszczególnych styków łącznika. Procesy fizyczne zachodzące w układach stykowych są ściśle związane z cechami konstrukcyjnymi styków oraz z parametrami napędów styków [1].

Układy stykowe stożkowe, dwuprzerwowe stosowane w załącznikach zwarcowych (rys. 1) umożliwiają skrócenie czasu łukowego załączania przy tych samych prędkościach styku ruchomego.



Rys.1. Schemat ideowy załącznika zwarcowego

Styki nieruchome wyposażone są w nacięcia wzdłużne (tworząc układ styczek), zapewniające większą elastyczność styków podczas zderzenia ze stykiem ruchomym. Wartość kąta styczności styków ma również wpływ na ugięcie się styczek styku nieruchomego. Wykorzystanie w tego typu konstrukcjach układów stykowych sprężyny napędowej, również do docisku zestyków, upraszcza konstrukcję załącznika zwarcowego i zmniejsza wymiary gabarytowe jego układu stykowego.

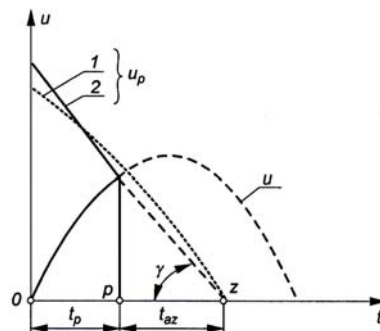
Załączniki zwarcowe są przeznaczone do zamykania obwodu probierczego przy określonej wybranej fazie na-

pięcia odniesienia. W związku z tym powinny się charakteryzować:

- odpowiednią zdolnością załączania prądu zwarcowego i dużą trwałością łączeniową,
- odpowiednią do wartości napięcia zasilającego prędkością zamykania styków,
- małym rozrzutem czasów własnych.

Wprowadzenie teoretyczne

Przebieg 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. 2). Czas łukowy załączania t_{az} , jest zależny od prędkości schodzenia się styków V_s , oraz od wartości natężenia pola elektrycznego E_k [2, 6], w obszarze stykowym.



Rys.2. Graficzne wyznaczenie czasu przedłukowego t_p i łukowego t_{az} podczas załączania prądu [5]

Wielkość mocy cieplnej dostarczanej stykom w wyniku wystąpienia zapłonu łuku przed metalicznym zetknięciem się styków, zależy od parametrów obwodu elektrycznego, oraz wielkości i szybkości zmiany przerwy stykowej. Jeśli przyjmiemy, że przebieg prądu zwarcowego łącznika jest określony przez $i_z(t)$, to wówczas energię wydzieloną w łuku W_{az} w czasie załączania t_{az} określimy z zależności:

$$(1) \quad W_{az} = \int_0^{t_{az}} u_a i_z(t) dt \cong K_a \int_0^{t_{az}} I_a(t) i_z(t) dt = K_a \int_0^{t_{az}} i_z(t) (d_s - n \bar{V}_s t) dt$$

gdzie: u_a – spadek napięcia łuku, V, K_a – gradient łuku, V/m, n – liczba przerw stykowych w biegunie łącznika, t_{az} – czas palenia się łuku podczas zamykania styków lub w czasie odskoku, s; I_a – długość łuku, m;

przy czym zakładając, że zapłon łuku wystąpił przy odległości d_s pomiędzy stykami i posługując się prędkością średnią zamykania styków \bar{V}_s w czasie palenia się łuku, oraz pomijając w tym przypadku wpływ pola magnetycznego na wydłużenie łuku, możemy otrzymać:

$$(2) \quad l_a(t) = d_s - n\bar{V}_s t$$

Aby zatem można było załączyć prąd w obwodzie w chwili przejścia napięcia przez wartość zerową i uniknąć przebicia przerwy między stykowej podczas załączania, powinny być spełnione następujące warunki [4, 5, 6]:

1. Dynamiczna wytrzymałość przerwy między stykowej podczas zamykania styków łącznika powinna być wyższa od chwilowej wartości napięcia zasilania. Powinien zatem być spełniony warunek:

$$(3) \quad V = \frac{\omega U_m}{nE_k}$$

gdzie: V - minimalna wartość prędkości styków w chwili mechanicznego ich zetknięcia się, E_k - wartość natężenia pola elektrycznego, przy którym następuje przebicie, n - liczba przerw w biegunie.

2. Rozrzut czasów własnych łącznika elektrycznego $t_c = t_p + t_{az}$, powinien być jak najmniejszy; dla załączników zwarciovych wartość rozrztu należy uznać za satysfakcjonującą jeśli:

$$(4) \quad \Delta t_c \leq 5^0 el$$

Dla wyłączników wysokiego napięcia dopuszcza się rozrztu:

$$(5) \quad \Delta t_c \leq \pm 1 ms [7].$$

Styki po zderzeniu się tworzą zestyk znajdujący się nadal w stanie ruchu. Następuje przemiana energii kinetycznej układu na energię potencjalną sprężystą, a następnie energii potencjalnej na energię kinetyczną ruchu zwrotnego. Część energii, która została nagromadzona w samych stykach i w elementach sprężystych styków może wywołać odskok styków i zestyk ulega ponownemu rozwarciu.

Między rozwartymi stykami w czasie odskoków styków, zapala się łuk elektryczny, który niszczy powierzchnię styków, zależnie od wartości natężenia prądu i czasu rozwarcia styków. Po pewnym czasie styki, w wyniku działania sprężyny dociskowej układu napędowego lub stykowego, zwierają się ponownie i ewentualnie znowu następuje odskok sprężysty styku ruchomego, o ile styki nie ulegną szczepieniu. Charakter, liczba odskoków i czas ich trwania zależą od wielu czynników, m. in. od materiału i masy styków [8], promienia krzywizny czołowej styków, wartości chwilowej prądu oraz prędkości styków [9].

Opis analityczny powyższych zagadnień w konkretnych rozwiązaniach konstrukcyjnych jest pracochłonny [1,3], stąd wydatną pomoc przy ich badaniu stanowią pomiary parametrów czasowych łącznika.

Cel pracy

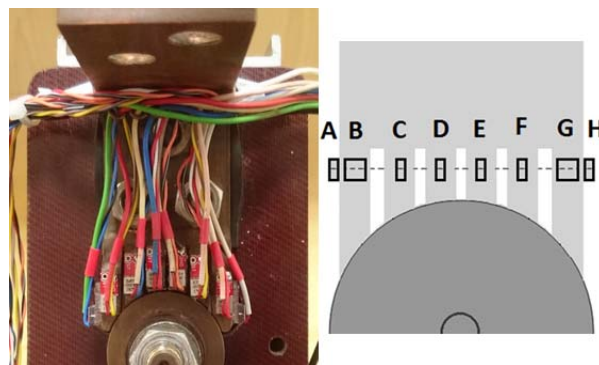
Przedmiotem analizy dynamiki ruchu styków oraz zestyków jest wyznaczenie przebiegów prędkości i przyspieszenia styku ruchomego przed zderzeniem ze stykiem nieruchomym oraz uzyskanie przebiegów drgań styku nieruchomego po zderzeniu. Dotychczasowa analiza praktyczna [2, 3, 4, 5] nie ukazuje przebiegów drgań w momencie zderzenia styków. Celem przeprowadzonych badań było uzyskanie czasów załączeń kolejnych styków układu palczastego oraz przebiegów przyspieszeń w odpowiednich kierunkach podczas zderzenia styków. Czasy te stanowią będą parametry wejściowe do modelu ukazującego przepływ prądu w stykach z uwzględnieniem nierównomiernego łączenia się styków ze stykiem nieruchomym, natomiast przebiegi przyspieszeń pokazywać

będą poziom drgań styków w procesie łączenia. Niniejszy artykuł jest rozwinięciem wcześniejszych opracowań [2].

Modyfikacje stanowiska pomiarowego

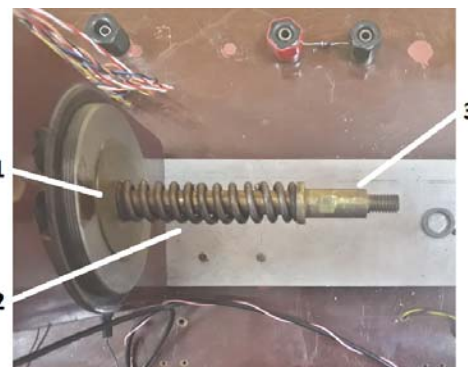
Wykonane badania [2] pokazały wpływ zakłóceń na tor pomiarowy pochodzących od włącznika klawiszowego włączającego obwód cewek wyzwalających. Na sygnały napięciowe z akcelerometru i ze styków nakładały się zakłócenia elektromagnetyczne spowodowane iskrzeniem styków włącznika w momencie załączania obciążenia indukcyjnego oraz w momencie rozłączania obwodu (wpływ zjawiska samoindukcji). Włącznik klawiszowy przystosowany był do załączania obwodów zasilanych ze źródła prądu przemiennego.

Zakłócenia te wyeliminowano poprzez zastosowanie elektronicznego załączania cewek wyzwalających z wykorzystaniem wysokonapięciowego w układzie klucza prądowego. Tranzystor załączany jest poprzez mikrowłącznik. Włącznik klawiszowy załączał cewki wyzwalające bezpośrednio przy prądzie około 300mA i wartości napięcia 220V DC. Prąd bazy tranzystora wynosi kilka miliamperów a potencjał na bazie wynosi kilka woltów. Załączana moc jest zatem znacznie mniejsza niż we wcześniejszej wersji stanowiska.



Rys.3. Zespół akcelerometrów do badań przebiegów drgań

W celu uzyskania przebiegów drgań bocznych styków nieruchomych na każdej ze styček zamontowany został dodatkowy akcelerometr z ukierunkowaną osią detekcji prostopadłą do kierunku ruchu styku ruchomego (rys. 3). Uzyskano w ten sposób sześć dodatkowych sygnałów pomiarowych. Wartość chwilowa napięcia tych sygnałów odpowiada chwilowej wartości przyspieszenia drgań styków. Zmieniony został panel gniazd wyjściowych.



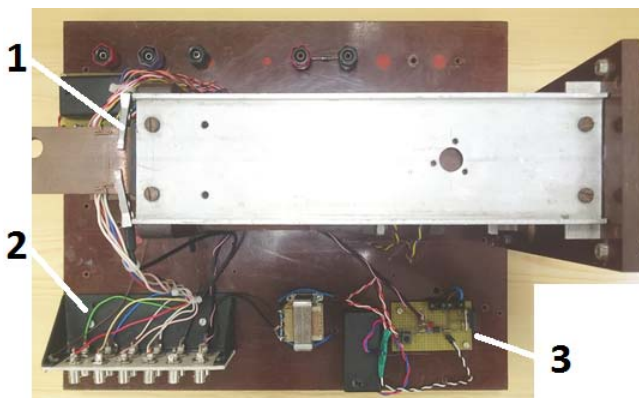
Rys.4. Sprężyna napędowa (widok z góry)

W związku z rozbudową o dodatkowe akcelerometry do badań drgań bocznych i zwiększoną liczbą sygnałów napięciowych o niskich wartościach (czułość akcelerometru wynosi 8 mV/g), zastosowano układ gwiazdowego prowadzenia masy sygnałowej, która łączy się tylko w

jednym punkcie wspólnym i tylko w jednym punkcie z masą zasilania akcelerometrów. Wszystkie akcelerometry zasilane są z baterii.

W celu uzyskania mniejszej wartości średniej czasu zamykania załącznika, zwiększona została siła docisku mechanicznego układu napędowego (dokręcona została nakrętka dociskowa). Rysunek 4 przedstawia układ napędowy: podstawa (1), sprężyna napędowa (2), nakrętka dociskowa (3). Zgodnie z tym rysunkiem, zwiększenie siły dociskowej następuje w kierunku poziomym i zwrocie skierowanym do podstawy sprężyny.

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 wyzwalań podstawy czasu oscyloskopu jest sygnał napięciowy na wyjściu transformatora znajdującego się w obwodzie cewek wyzwalających. Sygnały napięciowe wyprowadzone zostały na gniazda BNC, znajdujące się na panelu, w celu wygodnego podłączenia do przyrządów pomiarowych. Na rysunku 5 przedstawione jest zdjęcie stanowiska (bez oscyloskopu, łącznik (1), panel gniazd BNC (2), układ elektronicznego sterowania (3)).



Rys.5 Stanowisko pomiarowe po modyfikacjach



Rys.6. Fragment przebiegu przyspieszenia styku ruchomego

Obrobka danych pomiarowych

Analiza danych z badań w [2] nie uwzględniała faktu ich zaszumienia. Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego na sygnałach uzyskanych z danych z pomiarów wykonanych do niniejszego artykułu oraz uwzględnienie występowania składowych stałych w sygnałach, pozwoliło na lepsze zobrazowanie przebiegów oraz w przypadku drgań bocznych styków wyodrębnienie etapów ich drgań: od moment wyzwolenia załącznika są to drgania własne, natomiast dalej widoczne jest ugięcie stycki na zewnątrz bądź wewnątrz układu zestykowego. Wykorzystane zostały wbudowane funkcje Matlaba odnośnie generowania i

projektowania filtrów fir1 oraz filtfilt. Efekty odszumiania dla przebiegu przyspieszenia styku ruchomego przedstawia rysunek 6, natomiast dla przebiegu drgań styków styku nieruchomego rysunek 7.

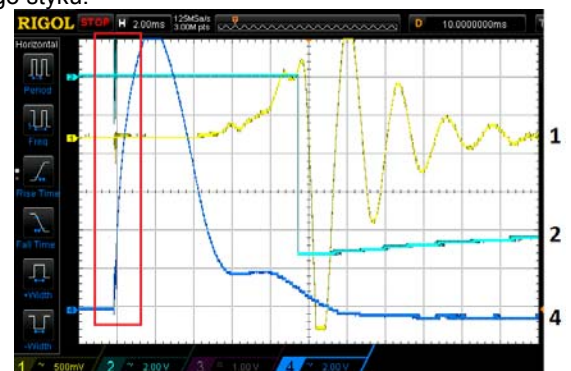


Rys.7. Fragment przebiegu przyspieszenia drgań jednej ze stycek

Wyniki pomiarów

Specyfika pomiarów wymagała jednoczesnego analizowania wielu sygnałów (siedmiu z akcelerometrów, jeden sygnał napięcia na stykach łącznika i jeden sygnał wyzwalań pracą oscyloskopu). Dane pomiarowe udało się uzyskać po podłączeniu i zsynchronizowaniu ze sobą trzech oscyloskopów wielokanałowych.

Dynamika ruchu styków (w badanym układzie jest to jeden styk ruchomy) polega na przedstawieniu przebiegu przyspieszenia w kierunku i zwrocie zgodnym z ruchem tego styku.



Rys.8. Oscylogram przebiegów: przyspieszenia (1), prądu cewki wyzwalającej (4) i napięcia na stykach nieruchomych (2) dla jednego z pomiarów przed modyfikacjami stanowiska



Rys.9. Oscylogram przebiegów: przyspieszenia (1), prądu cewki wyzwalającej (4) i napięcia na stykach nieruchomych (2) dla jednego z pomiarów po modyfikacjach stanowiska

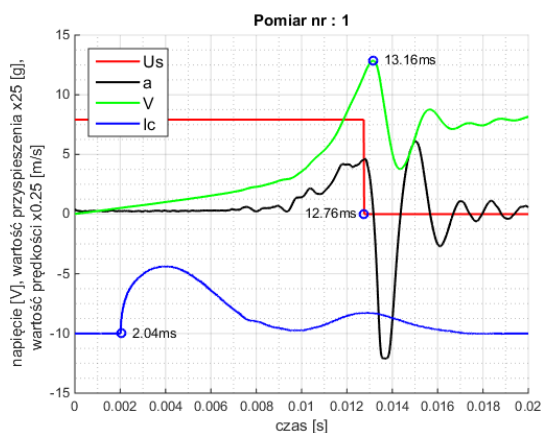
Rysunek 8 przedstawia oscylogramy przebiegów przed modyfikacjami, natomiast rysunek 9 po modyfikacjach. Momenty kiedy następuje wyzwolenie załącznika (podanie napięcia na cewkę wyzwalającą) zaznaczono w czerwonym

prostokacie. Poziom zakłóceń dzięki zastosowaniu sterowania elektronicznego znacznie zmniejszył się a sygnał zakłócający nie nakłada się na sygnały pomiarowe

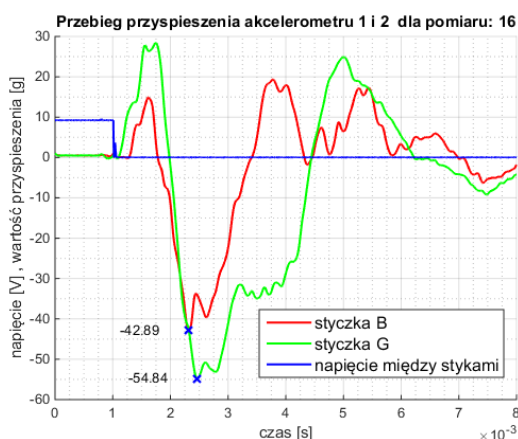
Oscylogramy umożliwiają przedstawienie wyraźnego momentu czasu w którym następuje podanie napięcia na cewki wyzwajające (przebieg ciemnoniebieski, kanał 4 oscyloskopu) oraz równie wyraźny moment zetknięcia się styków (przebieg błękitny, kanał 2 oscyloskopu).

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

Z przebiegu prądu płynącego przez cewkę wyzwajającą określa się moment wyzwolenia załącznika. Z przebiegu napięcia między stykami ruchomym i nieruchomym (w badanym układzie między dwoma stykami nieruchomymi) oraz przebiegu wartości prędkości uzyskuje się moment zamknięcia łącznika. Zgodnie z opisem dwóch metod w [1] wyznacza się czas własny załącznika. Rysunek 10 przedstawia przykładowy pomiar dynamiki ruchu styku ruchomego, oznaczone zostały odpowiednio (licząc od startu rejestracji) czas wyzwolenia, czas zamknięcia według metody I i czas zamknięcia wg metody II.



Rys.10. Przebiegi dla pomiaru 1.



Rys.11. Przebiegi drgań stycek

Dynamika ruchu zestyków (w badanym układzie jest to metaliczne połączenie styku ruchomego z dwoma stykami nieruchomymi) polega na zebraniu przebiegu przyspieszenia podczas drgań styków nieruchomych w kierunku prostopadłym do ruchu styku ruchomego. Dane dotyczące drgań stycek zbierane były parami, czyli według rysunku 4, zgodnie ze schematem: BG, CF, DE.

Na przebiegach (rys. 10) uzyskiwany jest moment czasu w którym następuje nagle zmiana wartości przyspieszenia. Każde wyzwolenie załącznika jest oddzielnym, niezależnym procesem, w związku z tym, zmiana ta może wystąpić z różnym opóźnieniem względem metalicznego zetknięcia się styków a cały proces może zachodzić z różną amplitudą.

Za metaliczne zetknięcie styków nieruchomych ze stykiem ruchomym uznaje się zetknięcie (z punktu widzenia czasu) pierwszej stycki w dolnym styku z pierwszą stycką w górnym styku.

Rozpoczęcie uginania się stycek w różnych momentach czasu świadczy o niejednoznaczności stykania się stycek styku nieruchomego ze stykiem ruchomym.

Wartość maksymalna została oznaczona krzyżykiem, znak wartości w zależności od zorientowania akcelerometru określa czy stycka ugina się do środka czy na zewnątrz układu zestykowego.

Analiza przeprowadzonych badań dynamiki styków

Tabela 1. przedstawia zestawienie wartości średniej czasu własnego z 20 uruchomień łącznika, wyznaczonych metodami opisanymi w [1] dla obu wersji stanowiska wraz z określeniem rozrzutu tego czasu wyznaczonym na podstawie metodyki opisanej w [3].

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla analizy styku ruchomego

Wersja stanowiska (napięcie cewek 220V)	Metoda I		Metoda II	
	Czas własny [ms]	Rozrzut czasu własnego [ms]	Czas własny [ms]	Rozrzut czasu własnego [ms]
1	12,97	0,389	13,35	0,393
2	10,25	0,566	10,64	0,570

Wyniki badań i obliczeń, jednoznacznie pokazują, iż zabiegi modyfikacyjne stanowiska pomiarowego przyczyniły się do uzyskania lepszej pracy załącznika. Czas załączania zmniejszył się o ok 21% dla metody I wyznaczania czasu własnego i o ok 20% dla metody II. Wartość rozrzutu czasu własnego dla obu metod zwiększyła się, może to wynikać z większej dynamiki drgań podczas zderzenia się styków. Wartość rozrzutu czasu własnego w stopniach elektrycznych wynosi odpowiednio: 10,19 °el i 10,26 °el, jednakże wartości rozrzutu czasu własnego dalej spełniają podstawowe założenie określone we wzorze (5).

Analiza przeprowadzonych badań dynamiki zestyku

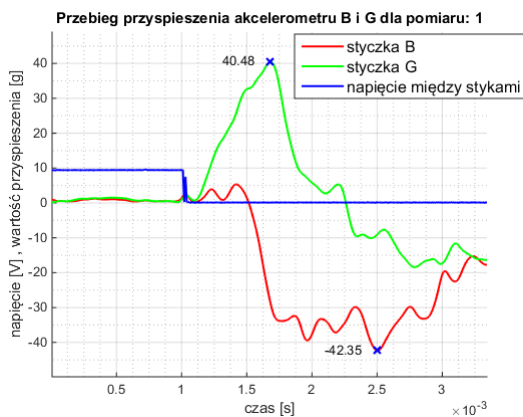
Rysunek 12 przedstawia powiększony fragment przebiegów drgań stycek z pomiaru 1 dla stycek B i G. W okresie od 1ms (moment wyzwolenia załącznika) do 1,5ms dla stycki B widoczne są drgania własne, natomiast dalej widoczne jest ugięcie stycki na zewnątrz układu zestykowego. Dla stycki G czas trwania drgań jest krótszy i ugięcie następuje również na zewnątrz (zgodnie ze zorientowaniem akcelerometrów).

Różne czasy trwania drgań i różne momenty rozpoczęcia procesu ugięcia świadczą o niejednoczesności stykania się stycek ze stykiem ruchomym.

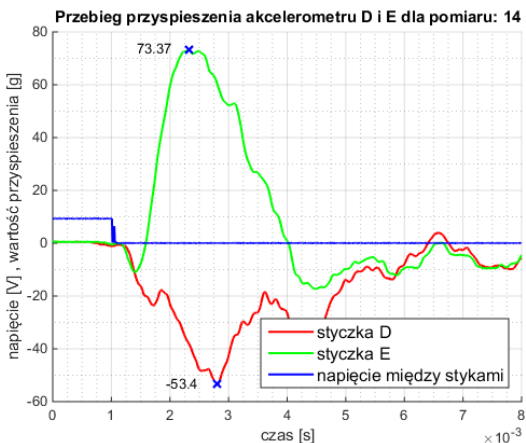
Rysunki 13-15 przedstawiają przebiegi przyspieszeń z kolejnych pomiarów z kolejnych stycek.

Tabela 2. przedstawia zestawienie wartości maksymalnych i minimalnych przyspieszeń stycek podczas 20 wyzwoleń załącznika.

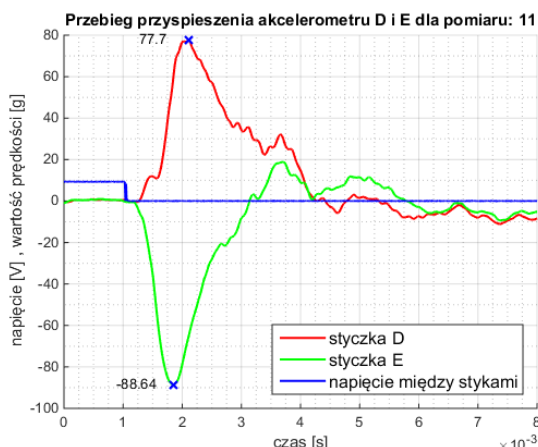
Wyniki badań i obliczeń pokazują, że stycki B i D (po lewej stronie osi pionowej układu zestykowego) uginają się bardziej na zewnątrz niż do wewnątrz. Natomiast stycki E i G (po prawej stronie układu zestykowego) uginają się bardziej do wewnątrz niż na zewnątrz. Może to świadczyć o osiowo-poziomym przekoszeniu układu zestykowego, całościowe spojrzenie na układ pokazuje uginanie się stycek w lewą stronę.



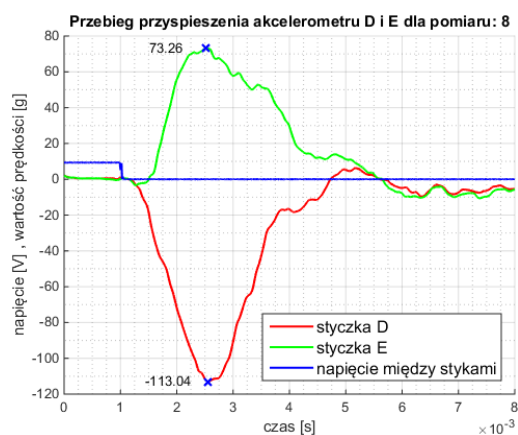
Rys. 12. Przebiegi drgań stykczek B i G dla pomiaru 1



Rys. 13. Przebiegi drgań stykczek D i E dla pomiaru 14



Rys. 14. Przebiegi drgań stykczek D i E dla pomiaru 11



Rys. 15. Przebiegi drgań stykczek D i E dla pomiaru 8

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla analizy drgań stykczek

Styczka	na zewnątrz		do wewnątrz	
	Maks [g]	Min [g]	Maks [g]	Min [g]
B	117,35	24,02	87,59	22,37
D	120,61	33,79	77,70	17,91
E	73,37	12,93	88,63	24,59
G	70,58	25,25	76,90	26,54

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, zwiększenie żywotności łącznika. Istnieje możliwość skrócenia czasu załączania łącznika poprzez odpowiednie techniki konstrukcyjne i montażowe, celem zapobiegania wystąpienia łuku. Badania wykazały iż jest to w pełni możliwe.

W procesie łączenia styków oprócz ugięcia pojedynczych stykczek, występują również ich drgania zaraz po momencie zetknięcia pierwszej stykczki ze stykiem ruchomym. Różny czas trwania tych drgań, a tym samym opóźnienie wystąpienia ugięcia świadczy o niejednoczesnym zetknięciu się stykczek ze stykiem ruchomym. Należy nadmienić iż uzyskane dane pomiarowe są bardzo zaszumione, a w samych sygnałach występuje wiele składowych, w związku z tym, proces badawczy wymagał pewnej obróbki danych. Jednoznaczne określenie momentów rozpoczęcia procesu drgań jest utrudnione, a zatem utrudnione jest również uzyskanie czasów zetknięć kolejnych stykczek ze stykiem nieruchomym. Wydaje się sensownym zaproponowanie jeszcze innej metody analizy, taka analiza może być pomiar napięcia indukowanego w cewkach zamontowanych na każdej ze stykczek podczas próby obciążeniowej, taka metoda badań jest w trakcie opracowywania.

Autorzy: mgr inż. Robert Berczyński, E-mail: robert.berczynski@wat.edu.pl,
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] Berczyński R., Kulas S.: *Diagnozowanie dynamiki ruchu styków łączników elektrycznych wysokiego napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, 1/2016, Warszawa.
- [3] Kolimas Ł., Kulas S., Piskała M., Zgliński K.: *Laboratorium obciążalności torów wieloprądowych i zestyków*, OWPW, Warszawa, 2014
- [4] Kulas S.: *Analiza i elementy syntezy wieloprądowych układów stykowych łączników elektrycznych*, OWPW, Warszawa, 2002.
- [5] Kulas S., Supronowicz H.: *Analiza procesu załączania prądu łącznikami elektrycznymi zestykowymi w układach kompensacji mocy biernej*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 12, Katowice, 2013.
- [6] Maksymiuk J.: *Aparaty elektryczne II Podstawy eksploatacji*, INPE z. 34, Warszawa, 2011
- [7] Ware B., Reckleff J., Mauthe G., Schett G.: *Synchronous switching of power systems*, CIGRE Session Report No. 13-205, 1990.
- [8] McBride J.: *An experimental investigation of contacts bounce in medium duty impact*, IEEE Trans. Componnets Hybrids and Manuf. Technol., vol. 15, 1992.
- [9] McBride J., Sharkh S.: *Electrical contact phenomena during impact*, IEEE Trans. CHMT-15., 1992.