

POLITECHNIKA GDAŃSKA

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska



Paweł Dembowski

**Identyfikacja dynamiczna
i ocena odporności sejsmicznej
konstrukcji dwukolumnowego
odłącznika wysokiego napięcia**

PRACA DOKTORSKA

PROMOTOR: dr hab. inż. Robert Jankowski, prof. nadzw. PG

KATEDRA KONSTRUKCJI METALOWYCH I ZARZĄDZANIA W BUDOWNICTWIE

GDAŃSK 2012

SPIS TREŚCI

Streszczenie	6
Summary	8
1 WSTĘP.....	10
1.1 Wprowadzenie	10
1.2 Cel, teza i struktura pracy.....	14
2 ODŁĄCZNIKI WYSOKIEGO NAPIĘCIA JAKO ELEMENTY SYSTEMU ENERGETYCZNEGO	17
2.1 Infrastruktura energetyczna przesyłu prądu elektrycznego.....	17
2.2 Stacje elektroenergetyczne	18
2.3 Cel i zakres stosowania odłączników	20
2.4 Rodzaje odłączników wysokiego napięcia.....	20
2.5 Budowa i zasada działania odłączników dwukolumnowych	23
3 BADANIA EKSPERYMENTALNE	27
3.1 Obiekt badań	27
3.2 Badania impulsowe na sztywnym fundamencie	28
3.2.1 Warianty pomiarowe	28
3.2.2 Analiza modalna badań impulsowych	30
3.2.3 Wyniki analizy modalnej na sztywnym fundamencie	33
3.2.3.1 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę I	33
3.2.3.1.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 9,83$ Hz	35
3.2.3.1.2 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 15,58$ Hz	38
3.2.3.2 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę II	41
3.2.3.2.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 9,83$ Hz	43
3.2.3.2.2 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 15,52$ Hz	46
3.2.3.3 Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę I	49

3.2.3.3.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 12,93$ Hz.....	51
3.2.3.4	Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę II	55
3.2.3.4.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 12,88$ Hz.....	57
3.2.3.5	Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I	61
3.2.3.5.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 8,45$ Hz.....	63
3.2.3.5.2	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 10,08$ Hz.....	67
3.2.3.6	Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę II.....	71
3.2.3.6.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 10,08$ Hz.....	73
3.2.3.7	Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I.....	77
3.2.3.7.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 9,11$ Hz.....	79
3.2.3.7.2	Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę II	83
3.2.3.7.3	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 10,03$ Hz.....	85
3.2.3.7.4	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 13,00$ Hz.....	89
3.3	Badania impulsowe na stole wstrząsowym	93
3.3.1	Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę I	96
3.3.1.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 6,49$ Hz.....	96
3.3.1.2	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 10,33$ Hz.....	97
3.3.2	Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę I	98
3.3.2.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 8,50$ Hz.....	98
3.3.3	Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I.....	99
3.3.3.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 6,37$ Hz.....	99
3.3.4	Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I.....	100
3.3.4.1	Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 8,86$ Hz.....	100
3.3.5	Zestawienie wyników badań impulsowych na sztywnym fundamencie oraz na stole wstrząsowym	101
3.4	Badania sweep-sine	103
3.4.1	Warianty pomiarowe	103
3.4.2	Analiza pomiarów badania właściwości dynamicznych.....	115
3.4.2.1	Analiza pomiarów przyspieszeń	115
3.4.2.2	Analiza pomiarów naprężeń.....	115
3.4.3	Wyniki badań.....	116
3.4.3.1	Kierunek wymuszenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty.....	116
3.4.3.2	Kierunek wymuszenia drgań wzdłużny X, odłącznik zamknięty	121
3.4.3.3	Kierunek wymuszenia drgań pionowy Z, odłącznik zamknięty	126
3.4.3.4	Kierunek wymuszenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty	132
3.4.3.5	Kierunek wymuszenia drgań wzdłużny X, odłącznik otwarty.....	137
3.4.3.6	Kierunek wymuszenia drgań pionowy Z, odłącznik otwarty.....	143
3.4.4	Zestawienie wyników badań modalnych na stole wstrząsowym.....	150
3.5	Badania zniszczeniowe	152

3.5.1	Wybór sygnału do testów zniszczeniowych	152
3.5.2	Przebieg testów.....	153
3.5.3	Wyniki testów zniszczeniowych.....	157
3.5.3.1	Test zniszczeniowy nr 2, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty	157
3.5.3.2	Test zniszczeniowy nr 3, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty	163
3.5.3.3	Test zniszczeniowy nr 5, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty	169
3.5.3.4	Test zniszczeniowy nr 15, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty	175
3.5.3.5	Test zniszczeniowy nr 16, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty	181
3.6	Wnioski.....	187
4	ANALIZY NUMERYCZNE	189
4.1	Model numeryczny konstrukcji odłącznika zamkniętego oraz otwartego	189
4.2	Analiza modalna	195
4.2.1	Wyniki analizy modalnej dla odłącznika zamkniętego.....	196
4.2.2	Wyniki analizy modalnej dla odłącznika otwartego	200
4.2.3	Zestawienie wyników	204
4.3	Nieliniowe analizy odpowiedzi konstrukcji odłącznika poddanego obciążeniom sejsmicznym.....	205
4.3.1	Dynamiczne równanie ruchu	205
4.3.2	Parametry analiz dynamicznych	207
4.3.3	Wyniki analiz dynamicznych dla odłącznika zamkniętego	208
4.3.3.1	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi El Centro	209
4.3.3.2	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kobe	215
4.3.3.3	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kushiro.....	221
4.3.3.4	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi San Fernando.....	227
4.3.3.5	Mapy maksymalnych naprężeń.....	233
4.3.4	Wyniki analizy dynamicznej dla odłącznika otwartego	237
4.3.4.1	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi El Centro	238
4.3.4.2	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kobe	244
4.3.4.3	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kushiro.....	250
4.3.4.4	Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi San Fernando.....	256
4.3.4.5	Mapy maksymalnych naprężeń oraz odkształceń plastycznych	262
4.4	Analiza parametryczna.....	267
4.5	Wnioski.....	271

5	PODSUMOWANIE	273
5.1	Wnioski końcowe.....	273
5.2	Uwagi ogólne.....	274
	Literatura.....	276
	Normy.....	282
	Strony internetowe	282
	Podziękowania	282

Streszczenie

Sprawność elementów sieci energetycznej po trzęsieniu ziemi jest bardzo ważnym elementem bezpieczeństwa na obszarze objętym kataklizmem. Brak elektryczności poważnie utrudnia prowadzenie akcji ratunkowej, potęguje chaos, wzmagając panikę wśród mieszkańców. Tymczasem w przeszłości wielokrotnie obserwowano uszkodzenia elementów infrastruktury energetycznej na skutek wstrząsów sejsmicznych. Istotnym elementem systemu energetycznego są tzw. odłączniki wysokiego napięcia, które służą do galwanicznego oddzielania obwodów w stanie otwartym (np. podczas remontów) i tworzą bezpieczną i widoczną przerwę izolacyjną. Celem niniejszej dysertacji jest przeprowadzenie kompleksowych badań dotyczących identyfikacji dynamicznej i oceny odporności sejsmicznej dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia z uwzględnieniem zniszczeniowych testów eksperymentalnych oraz nieliniowych analiz numerycznych.

W pierwszej części pracy szczegółowo opisano badania eksperymentalne analizowanej konstrukcji odłącznika. Najpierw przeprowadzono szereg badań impulsowych po zamocowaniu urządzenia na sztywnym fundamencie, w celu wyznaczenia dominujących częstotliwości oraz form drgań własnych konstrukcji dla konfiguracji zamkniętej oraz otwartej. Dalsze badania przeprowadzono na stole wstrząsowym, na którym powtórzono testy impulsowe oraz wykonano testy sweep-sine. W ostatnim etapie badań eksperymentalnych wykonano testy zniszczeniowe mające na celu określenie odporności sejsmicznej analizowanego odłącznika. W drugiej części dysertacji przedstawiono wyniki dokładnych analiz numerycznych z zastosowaniem metody elementów skończonych. Najpierw wykonano analizę modalną w celu weryfikacji dokładności stworzonego modelu numerycznego. Następnie przeprowadzono trójwymiarową nieliniową analizę dynamiczną przy wymuszeniu zapisami różnych trzęsień ziemi (El Centro 1940, Kobe 1995, Kushiro 1993 oraz San Fernando 1971) obejmującą nieliniowość materiałową oraz geometryczną. W ostatnim etapie badań przeprowadzono analizę parametryczną dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego dla konfiguracji zamkniętej odłącznika.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentalnych badań impulsowych na sztywnym fundamencie otrzymano szereg dominujących częstotliwości oraz formy drgań własnych konstrukcji. Badania modalne przeprowadzone po zamocowaniu odłącznika do platformy stołu wstrząsowego pokazały spadek częstotliwości drgań własnych, ze względu na podatność stołu oraz interakcję drgań pomiędzy stołem a odłącznikiem. W wyniku różnych badań

modalnych (badania impulsowe – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza naprężeń) przeprowadzonych dla odłącznika zamocowanego na stole wstrząsowym uzyskano bardzo podobne wartości dominujących częstotliwości drgań własnych konstrukcji, co potwierdza skuteczność każdej z użytych metod. Badania zniszczeniowe pokazały, iż rama podstawy oraz dolne części kolumn są miejscami najbardziej wytężonymi na skutek działania obciążeń dynamicznych. Konstrukcja odłącznika uległa trwałemu uszkodzeniu na skutek pęknięcia czopa łożyska w stopie obrotowej u dołu jednej z kolumn.

Wyniki nieliniowych analiz numerycznych pokazują, iż miejscami krytycznymi odłącznika dwukolumnowego jest rama podstawy oraz połączenia pomiędzy ramą a kolumnami. W miejscach tych zaobserwowano największe wartości naprężeń. W przypadku odłącznika w konfiguracji zamkniętej w żadnym punkcie nie doszło do przekroczenia granicy plastyczności w metalowych częściach konstrukcji ani do kruchego pęknięcia części ceramicznych. Z kolei, dla odłącznika otwartego poddanego działaniu trzęsienia ziemi San Fernando zaobserwowano odkształcenia plastyczne w łapach ramy podstawy oraz w śrubach łączących ramę podstawy z jedną z kolumn. Wyniki analizy parametrycznej przeprowadzonej dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego wskazują, iż zwiększenie siły docisku prowadzi do poprawy zachowania się konstrukcji podczas trzęsienia ziemi.

Summary

The efficiency of the energetic network is a very important safety issue in the region experienced by the earthquake. Lack of electricity makes difficulties in rescue operation, intensifies chaos and panic among the citizens. Meanwhile, many energetic infrastructure devices were observed to be damaged during past earthquakes. High voltage disconnect switches are important elements of the energetic infrastructure system used to separate electric circuits (i.e. during repairs), which should remain fully operational after the ground motion. The aim of the present dissertation is to conduct a detailed study concerning the identification of dynamic properties as well as the seismic resistance of a two-column disconnect switch incorporating experimental damage tests and nonlinear numerical analyses.

The experimental tests dealing with the analysed structure are described in details in the first part of the work. Firstly, a number of impact tests have been conducted after mounting the device on a rigid foundation, so as to determine the natural frequencies and vibration modes of the structure. Further study has been carried out using the shaking table, on which the impact tests have been repeated and the sweep-sine tests have been conducted. The damage tests, focused on the determination of the seismic resistance of the analysed disconnect switch, have been carried out in the last stage of the experimental study. The results of the detailed numerical analyses, with the use of the finite element method, are described in the second part of the dissertation. Firstly, a modal analysis has been conducted in order to verify the accuracy of the numerical model created. Then, the nonlinear three-dimensional dynamic analyses have been carried out under different earthquake excitations (El Centro of 1940, Kobe of 1995, Kushiro of 1993 and San Fernando of 1971), incorporating material as well as geometric nonlinearities. The parametric analysis for different values of the compression force in the arms of the current circuit has been conducted in the last stage of the numerical study.

A number of different natural frequencies as well as natural vibration modes of the structure have been obtained as a result of experimental impact tests on a rigid foundation. Modal tests conducted on the shaking table show a decrease in the natural frequencies due to flexibility of the table and interaction between the table and the switch. Very similar values of the natural frequencies of the structure have been obtained as the result of different types of the shaking table tests (impact tests – analysis of accelerations, sweep-sine tests – analysis of accelerations, sweep-sine tests – analysis of stresses), what confirms the efficiency of each of

the methods. The results of the damage tests indicate that the base frame as well as the lower parts of the columns are the most critical location of the structure under dynamic excitations. The disconnect switch has been damaged as the result of rupture of the bearing journal in the rotary footing at the base of one of the columns.

The results of nonlinear numerical analyses indicate that the base frame as well as the connections between the base frame and the columns are the most critical locations of the structure, in which the largest values of stresses have been recorded. In the case of the disconnect switch in the closed condition, the yielding strength has not been exceeded in any place in the metal parts nor brittle cracking has taken place in the ceramic parts. On the other hand, in the case of the structure in the open condition under the San Fernando earthquake excitation, plastic deformations in the clamps of the base frame and in the bolts, connecting the frame base with one of the columns, have been observed. The results of the parametric analysis, conducted for different values of the compression force in the arms of the current circuit, indicate that the increase in the force improves the behaviour of the structure under ground motions.

1 Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Sprawność elementów sieci energetycznej po trzęsieniu ziemi jest bardzo ważnym elementem bezpieczeństwa na obszarze objętym kataklizmem (Chen i Scawthorn 2003, Wiegel 1970). Brak elektryczności poważnie utrudnia prowadzenie akcji ratunkowej, potęguje chaos, wzmaga panikę wśród mieszkańców. Tymczasem w przeszłości wielokrotnie obserwowano uszkodzenia elementów infrastruktury energetycznej na skutek wstrząsów sejsmicznych (zob. np. Yang i Zhao 2009, Mazda i inni 2004, Anagnos i Ostrom 2000, Bastami 2008, Takhirov i Gilani 2009). Dotyczy to zarówno linii przesyłowych (Rys. 1.1) oraz stacji elektroenergetycznych (Rys. 1.2, 1.3). Dla przykładu, po trzęsieniu ziemi Northridge w 1994 roku, uszkodzenia były tak rozległe, że 2,5 miliona mieszkańców Los Angeles i okolic pozbawiona była elektryczności (Hall 1995). Przerwy w dostawie energii elektrycznej spowodowane uszkodzeniem infrastruktury energetycznej w wyniku trzęsienia ziemi Bingöl (Turcja) w roku 2003 trwały kilka dni (Doğangün 2004). Z kolei, po trzęsieniu ziemi Dinar (1.10.1995), pełną sprawność sieci energetycznej przywrócono dopiero po kilku tygodniach (Tezcan i Ipek 1996). Uszkodzenia elementów infrastruktury energetycznej na skutek trzęsienia ziemi w Kobe (17.01.1995) spowodowały, iż elektryczności pozbawionych było 2,7 miliona domów na znacznym obszarze dotkniętym kataklizmem (Doi 2004). Również podczas trzęsienia ziemi na Podhalu w 2004 roku nastąpiło uszkodzenie na linii energetycznej w okolicy miejscowości Maruszyna, co spowodowało kilkugodzinną przerwę w dostawie prądu do wielu miejscowości regionu (Zembaty i inni 2005).

Istotnym elementem systemu energetycznego są tzw. odłączniki wysokiego napięcia, które instalowane są w stacjach elektroenergetycznych. Służą one do galwanicznego oddzielenia obwodów w stanie otwartym (np. podczas remontów) i tworzą bezpieczną przerwę izolacyjną. Podstawowym stanem pracy urządzenia jest jednak stan zamknięty, który umożliwia przepływ prądu. Do sprawnego i bezpiecznego działania tych urządzeń niezbędne jest stosowanie wytrzymałych i niezawodnych materiałów. Jednakże, specyficzna budowa odłączników sprawia, że są one konstrukcjami bardzo podatnymi na wpływy dynamiczne i stąd ich nader częste uszkodzenia podczas trzęsień ziemi (Rys. 1.4). Od producentów oczekuje się, aby odłączniki wysokiego napięcia przechodziły rygorystyczne testy sejsmiczne (zob. np. De Silva 1980, ISMES 1996, Zembaty i inni 2001) przeprowadzane na specjalnych stanowiskach badawczych, tzw. stołach wstrząsowych (zob. np. Jankowski 2007, 2010,

Burkacki i Jankowski 2012, Falborski i Jankowski 2012). Testy takie muszą wykazać, iż badane urządzenie nie dozna nawet najmniejszych uszkodzeń na skutek działania obciążenia sejsmicznego, jakie może wystąpić na danym obszarze.



Rys. 1.1. Wieża transmisyjna uszkodzona podczas trzęsienia ziemi Chi-Chi na Tajwanie, 21.09.1999 (<https://www.eeri.org>).



Rys. 1.2. Stacja elektroenergetyczna uszkodzona podczas trzęsienia ziemi San Fernando, 9.02.1971 (<http://peer.berkeley.edu>).



Rys. 1.3. Stacja elektroenergetyczna uszkodzona podczas trzęsienia ziemi na Haiti, 12.01.2010 (<http://www.fema.gov>).



Rys. 1.4. Odłącznik wysokiego napięcia uszkodzony podczas trzęsienia ziemi Northridge, 17.01.1994 (<http://earthquake.tier.org.tw>).

Badania naukowe dotyczące zachowania się infrastruktury energetycznej podczas trzęsień ziemi prowadzone są w różnych ośrodkach badawczych na świecie już od około 30 lat, jednakże w ostatnim czasie zostały one znacznie zintensyfikowane. Obejmują one między innymi prognozowanie wystąpienia awarii (zob. np. Nuti i inni 2007, Lim i Song 2012, Poljanšek i inni 2012) oraz optymalizacji procesu naprawy uszkodzonych urządzeń po trzęsieniu ziemi (zob. Çağnan i inni 2006, Xu i inni 2007, Adachi i Ellingwood 2008, Cimellaro i inni 2010, Cavalieri i inni 2012), tak, aby jak najszybciej przywrócić dostawę

energii elektrycznej dla mieszkańców i przemysłu. Należy nadmienić, iż badanie odporności całej sieci energetycznej z uwagi na obciążenia sejsmiczne jest zadaniem niezmiernie trudnym ze względu na dużą odległość pomiędzy skrajnymi jej elementami (Duenas-Osorio i inni 2007). Badania wskazują jednak, iż efektywnym podejściem do tego zagadnienia może być zastosowanie podejścia probabilistycznego (Han i Davidson 2012, Vanzi 1996, 2000, Song i Ok 2010). Dodatkowo należy mieć na uwadze fakt, iż awaria całego systemu może być spowodowana przez uszkodzenie tylko jednego elementu sieci (Shumuta 2007, Li i inni 2008). Możliwe jest także wystąpienie zniszczenia progresywnego skutkującego uszkodzeniem kolejnych elementów systemu (Shinozuka i inni 2007).

Prace badawcze obejmują również testy eksperymentalne i analizy numeryczne zachowania się poszczególnych elementów systemu energetycznego poddanych obciążeniom dynamicznym związanym z działaniem wstrząsów sejsmicznych. Li i inni (2005) badał odpowiedź wieży transmisyjnej podczas trzęsienia ziemi wykonując testy na stole wstrząsowym oraz analizy numeryczne przy użyciu uproszczonych modeli konstrukcji. W celu wyznaczenia parametrów dynamicznych (dominujących częstotliwości oraz współczynników tłumienia), niezbędnych przy określaniu odporności sejsmicznej, Villaverde i inni (2001) przeprowadzili szereg testów polowych na transformatorach. Inni badacze skupili swoją uwagę na poszczególnych elementach stacji elektroenergetycznych (zob. np. Schiff i inni 1979, Knight i Kempner 2004, Saadeghvaziri i inni 2004, Dastous 2007). Interakcję pomiędzy urządzeniami elektrycznymi podczas wstrząsów sejsmicznych analizował Der Kiureghian i inni (2001) oraz Song i inni (2007). W celu poprawienia odporności sejsmicznej analizowano również możliwość zastosowania wibroizolacji pod wybrane urządzenia (zob. np. Junke i inni 2008).

W przeciwieństwie do innych elementów systemu energetycznego, wyniki badań dotyczące odłączników wysokiego napięcia poddanych wstrząsom sejsmicznym są dość ograniczone. Zembaty i inni (2001) przeprowadzili analizę modalną oraz wykonali obliczenia odpowiedzi sejsmicznej odłącznika pantografowego stosując liniowy model numeryczny konstrukcji składający się z elementów prętowych. W artykule opisali również zasady związane z sejsmiczną kwalifikacją odłączników wysokiego napięcia przytaczając przykład badań na stole wstrząsowym. Badania związane z sejsmiczną kwalifikacją odłączników opisane zostały również przez Kong'a i Reinhorn'a (2009) oraz Mosalam'a i innych (2012). Dodatkowo, Kong i Reinhorn (2009) przeanalizowali efektywność zastosowania wibroizolacji jako metody redukcji odpowiedzi konstrukcji podczas trzęsień ziemi. Lü i inni (2011) badali odporność sejsmiczną wybranego typu odłącznika wyznaczając tzw. krzywe wytrzymałości

konstrukcji dla różnych intensywności trzęsień ziemi. Analizę przeprowadzili w zakresie sprężystym przy użyciu modelu numerycznego, w którym części konstrukcji modelowane były elementami belkowymi. Uproszczoną metodę wyznaczania krzywych wytrzymałości dla odłączników zaproponowali też w swojej pracy Paolacci i Giannini (2009).

1.2 Cel, teza i struktura pracy

Cel pracy

Przegląd literatury dotyczącej zachowania się odłączników wysokiego napięcia poddanych obciążeniom sejsmicznym wskazuje, iż dotychczasowe badania przeprowadzono głównie dla zakresu liniowego pracy tych konstrukcji. Pomimo faktu, iż urządzenia te powinny pracować podczas trzęsienia ziemi w zakresie sprężystym to jednak z punktu widzenia ich odporności sejsmicznej analiza w zakresie nieliniowym może być bardzo istotna. Na jej podstawie możliwe jest bowiem określenie dokładnych przyczyn uszkodzeń odłączników podczas wcześniejszych, dużych trzęsień ziemi. Ponadto, wyniki takich badań mogą dostarczyć cennych wskazówek dotyczących bezpiecznego projektowania odłączników wysokiego napięcia na trzęsienia ziemi, które mogą wydarzyć się w przyszłości, w tym te największe wstrząsy sejsmiczne powodujące katastrofalne skutki. Dlatego też celem niniejszej dysertacji jest przeprowadzenie kompleksowych badań dotyczących identyfikacji dynamicznej i oceny odporności sejsmicznej odłącznika wysokiego napięcia z uwzględnieniem zniszczeniowych testów eksperymentalnych oraz nieliniowych analiz numerycznych obejmujących nieliniowość materiałową oraz geometryczną. Szczegółowym badaniom poddano odłącznik dwukolumnowy obrotowy polskiej produkcji, który miałby być eksportowany do krajów o dużej aktywności sejsmicznej. Badania objęły kompleksowe testy eksperymentalne w skali rzeczywistej oraz dokładne nieliniowe analizy numeryczne. Badano odłącznik zarówno w konfiguracji zamkniętej jak i otwartej.

Teza pracy

Na podstawie wstępnie przeprowadzonych badań i analiz postawiono następującą tezę: „Odporność sejsmiczna dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia zależy przede wszystkim od konstrukcji ramy podstawy oraz dolnych części kolumn i wynika ze sposobu zamocowania kolumn z ramą”.

Struktura pracy

Praca składa się z następujących rozdziałów:

W **rozdziale 1** opisano analizowane zagadnienie, przytoczono dotychczasowe badania dotyczące zachowania się infrastruktury energetycznej (w tym odłączników wysokiego napięcia) podczas trzęsień oraz przedstawiono cel, tezę i strukturę pracy.

Odłączniki wysokiego napięcia, jako elementy systemu energetycznego, opisano w **rozdziale 2**. Rozdział obejmuje takie zagadnienia jak: infrastruktura energetyczna przesyłu prądu elektrycznego, stacje elektroenergetyczne, cel i zakres stosowania odłączników, rodzaje odłączników wysokiego napięcia, budowa i zasada działania odłączników dwukolumnowych.

W **rozdziale 3** szczegółowo opisano badania eksperymentalne dotyczące analizowanego odłącznika dwukolumnowego. W pierwszej kolejności przeprowadzono szereg badań impulsowych na sztywnym fundamencie, w celu wyznaczenia dominujących częstotliwości oraz form drgań własnych konstrukcji dla konfiguracji zamkniętej oraz otwartej. Każde z badań impulsowych polegało na przyłożeniu impulsu siły (uderzeniu) w odpowiednim punkcie konstrukcji i rejestrowaniu drgań poszczególnych punktów konstrukcji za pomocą czujników przyspieszeń. Dalsze badania przeprowadzono na stole wstrząsowym, na którym powtórzono testy impulsowe oraz wykonano testy sweep-sine. W ostatniej części rozdziału opisano badania zniszczeniowe mające na celu określenie odporności sejsmicznej analizowanego odłącznika. Jako wymuszenie na stole wstrząsowym przyjęto dudnienie sinusoidalne w kierunku poprzecznym, co pozwoliło na określenie poziomu eksploatacyjnego badanej konstrukcji. W kolejnych próbach zwiększano poziom wymuszenia, aż do momentu zarejestrowania uszkodzenia konstrukcji.

Rozdział 4 zestawia wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES). W pierwszym etapie wykonano analizę modalną celem weryfikacji dokładności stworzonego modelu numerycznego poprzez porównanie wartości częstotliwości drgań własnych otrzymanych z analizy numerycznej i badań eksperymentalnych. Następnie przeprowadzono trójwymiarową nieliniową analizę dynamiczną przy wymuszeniu zapisami różnych trzęsień ziemi: El Centro (1940), Kobe (1995), Kushiro (1993) oraz San Fernando (1971) dla konfiguracji zamkniętej i otwartej. Przyjęto elastyczno-plastyczne modele materiału z odpowiednią wartością granicy plastyczności dla poszczególnych metalowych elementów konstrukcji. Założono również odpowiednią odporność na kruche pękanie w przypadku ceramiki. Ponadto, uwzględniono nieliniowość geometryczną, w odniesieniu do stykających się ramion odłącznika zamkniętego, poprzez użycie elementów kontaktowych typu GAP. W ostatnim etapie badań

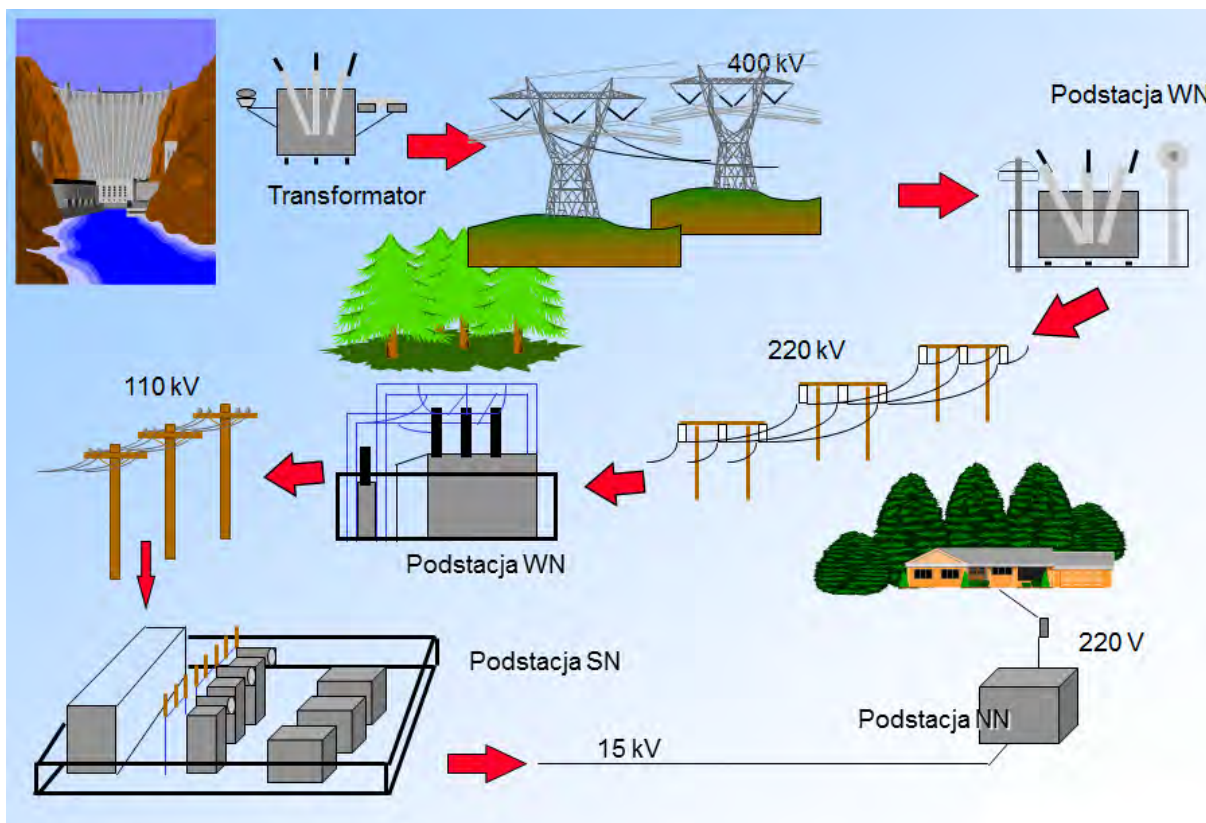
przeprowadzono analizę parametryczną dla różnych wartości siły ściskającej ramiona konstrukcji. W analizie tej wykorzystano zapisy trzęsienia ziemi El Centro (1940) przykładając je w trzech kierunkach.

Pracę kończy **rozdział 5**, który zawiera wnioski końcowe oraz uwagi ogólne.

2 Odłączniki wysokiego napięcia jako elementy systemu energetycznego

2.1 Infrastruktura energetyczna przesyłu prądu elektrycznego

Produkowana w elektrowniach konwencjonalnych energia elektryczna pochodzi głównie z paliw kopalnych, takich jak węgiel, gaz czy ropa. Energia produkowana jest również w elektrowniach jądrowych, elektrowniach wodnych oraz pochodzi ze źródeł odnawialnych. Z elektrowni do odbiorców instytucjonalnych oraz indywidualnych jest ona transportowana przy wykorzystaniu elementów sieci energetycznej. Żeby ograniczyć straty podczas przesyłu, prąd transportowany jest na znaczne odległości pod bardzo wysokim napięciem. W miarę zbliżania się do metropolii, stopniowo zmniejsza się wartość napięcia w odpowiednich podstacjach, tak zwanych stacjach elektroenergetycznych. Po ostatecznym przekształceniu, parametry prądu odpowiadają tym, które potrzebne są u odbiorcy instytucjonalnego czy w prywatnym gospodarstwie domowym. Na Rys. 2.1 przedstawiono przykładowy schemat przesyłu energii elektrycznej począwszy od źródła jej powstawania aż do odbiorcy końcowego.



Rys. 2.1. Infrastruktura przesyłu energii elektrycznej (<http://www.hapam.pl>).

2.2 Stacje elektroenergetyczne

Rozdział energii w sieciach przesyłowych umożliwiają stacje rozdzielcze. Składają się one głównie z rozdzielnic, zawierających przyrządy łączeniowe, zabezpieczające i pomiarowe. Transformacje energii, czyli przetwarzanie energii prądu przemiennego z jednego napięcia na inne, przeprowadzane są w stacjach transformatorowych. Większość stacji elektroenergetycznych spełnia obie te funkcje, czyli zawierają zarówno transformatory, jak i rozdzielnice różnych napięć (Musiał 2008).

Stacje elektroenergetyczne są bardzo złożone. W związku z tym istnieje wiele sposobów podziału stacji pod kątem różnych kryteriów. Warto wyróżnić trzy podstawowe kryteria podziału (Dołęga 2007):

- a) napięcie znamionowe strony górnej stacji,
- b) rola i znaczenie stacji w systemie elektroenergetycznym,
- c) sposób budowy stacji.

Podział ze względu na napięcie znamionowe strony górnej stacji obejmuje:

- stacje ultra wysokich napięć (UWN) – napięcia wyższe niż 750 kV,
- stacje najwyższych napięć (NN) – napięcie: 400 kV i 750 kV,
- stacje wysokich napięć (WN) – napięcie: 110 kV, 123 kV, 220 kV,
- stacje średnich napięć (SN) – napięcie: 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 30 kV,
- rozdzielnie niskich napięć (nn) – napięcie do 1 kV.

Ze względu na rolę i znaczenie stacji w systemie elektroenergetycznym możemy wyróżnić:

- stacje elektrowniane
- stacje transformatorowe i stacje transformatorowo-rozdzielcze
- główne punkty zasilające
- rozdzielnie sieciowe miejskie
- punkty transformatorowe
- rozdzielnie sieciowe przemysłowe
- stacje główne
- stacje pośrednie
- stacje oddziałowe
- rozdzielnie odbiorcze.

Podział ze względu na budowę stacji obejmuje:

- stacje wewnętrzne,
- stacje napowietrzne.

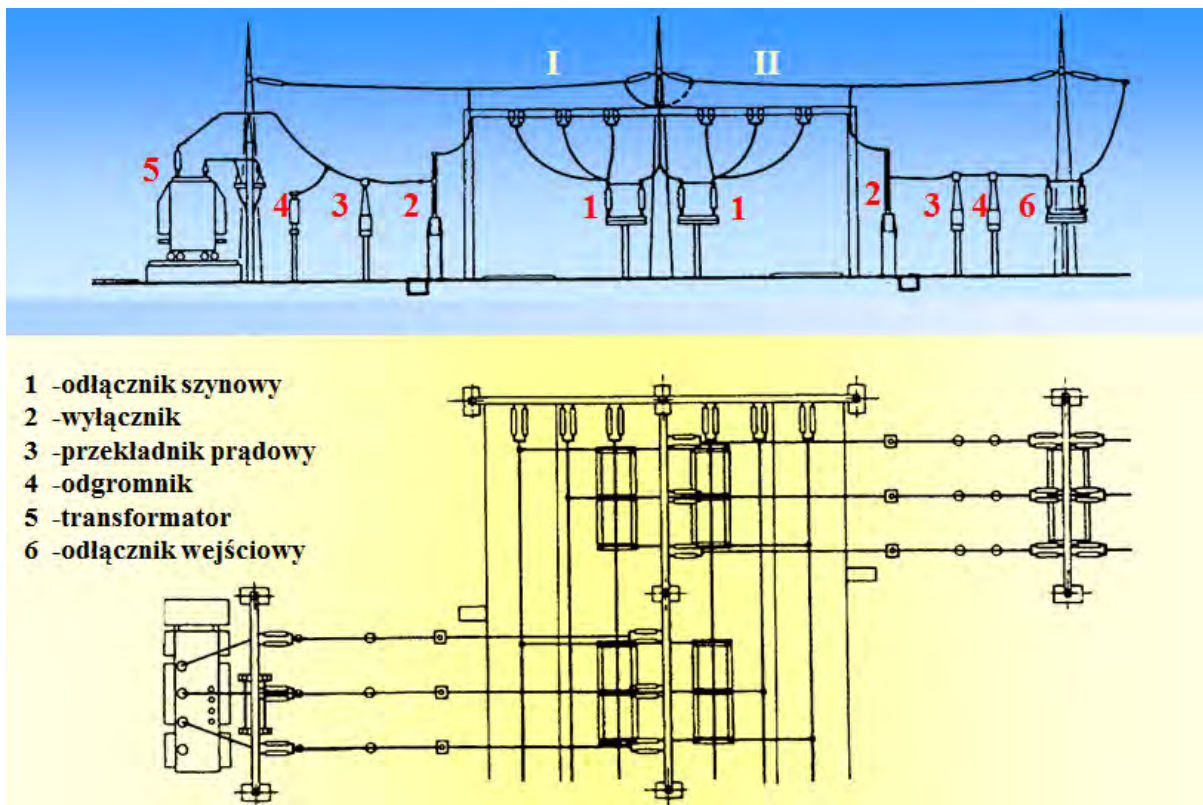
Stacje elektroenergetyczne powinny być zaprojektowane i wykonane tak, aby zastosowane rozwiązania techniczne i organizacyjne zapewniały (Dołęga 2007):

- dostateczną niezawodność pracy stacji,
- łatwość eksploatacji,
- spełnienie wymagań dotyczących warunków zasilania odbiorców,
- możliwość łatwej rozbudowy,
- bezpieczeństwo personelu obsługującego,
- możliwie najmniejsze nakłady inwestycyjne i eksploatacyjne.

W stacjach elektroenergetycznych występują następujące urządzenia:

- szyny zbiorcze,
- odłączniki,
- wyłączniki,
- rozłączniki,
- uziemniki,
- bezpieczniki,
- zwierniki,
- przekładniki,
- odgromniki,
- dławiki zwarciovowe,
- transformatory.

Na Rys. 2.2 przedstawiono schemat typowej stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia z zaznaczeniem jej głównych elementów.



Rys. 2.2. Schemat stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia (<http://www.hapam.pl>).

Na Fot. 2.1 przedstawiono fragment stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia (123 kV) z zaznaczonymi wyłącznikami, przekładnikami oraz odłącznikami.



Fot. 2.1. Fragment stacji elektroenergetycznej wysokiego napięcia (<http://www.hapam.pl>).

2.3 Cel i zakres stosowania odłączników

Odłączniki, jako jedne z elementów stacji elektroenergetycznych, służą do tworzenia przerw izolacyjnych w obwodach elektrycznych i są przeznaczone do zamykania i otwierania obwodów w stanie bezprądowym. Konieczność ich instalowania wynika z faktu, iż przy przeprowadzaniu prac konserwacyjno-remontowych musi być zapewniona widoczna i bezpieczna przerwa izolacyjna, co najmniej od strony zasilania pola (Musiał 2008). Zakres stosowania odłączników związany jest ściśle z napięciem znamionowym danej stacji elektroenergetycznej (patrz rozdział 2.2).

2.4 Rodzaje odłączników wysokiego napięcia

W stacjach elektroenergetycznych stosowane są następujące rodzaje odłączników wysokiego napięcia (Dołęga 2007):

- sieczne,
- poziomoobrotowe jedno- i dwuprzzerwowe,
- pionowe (pantografowe, chwytakowe, nożycowe).

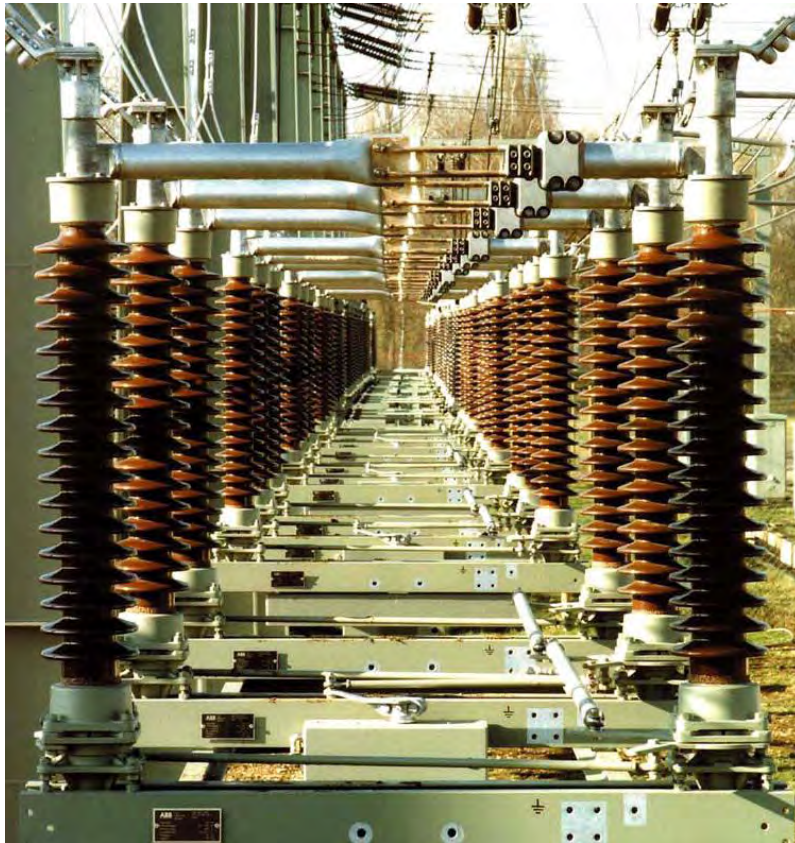
Odłączniki sieczne charakteryzują się stykami wykonanymi z płaskowników, prętów lub rur i są łącznikami izolacyjnymi o siecznym ruchu styków w płaszczyźnie pionowej. Przykład odłącznika siecznego przedstawiono na Fot. 2.2.



Fot. 2.2. Odłącznik sieczny (<http://www.hapam.pl>).

Odłączniki poziomoobrotowe stosowane są zwykle na napięcia 110 kV i wyższe. Noże takiego odłącznika poruszają się prostopadle do osi izolatorów wsporczych. Spotyka się dwa rodzaje odłączników poziomoobrotowych: jednoprzerwowe dwukolumnowe i dwuprzerwowe trójkolumnowe. W odłącznikach jednoprzerwowych dwukolumnowych obracają się oba izolatory wraz z nożami. Z kolei, w odłącznikach dwuprzerwowych trójkolumnowych obraca się tylko izolator środkowy. Na Fot. 2.3 przedstawiono przykład odłącznika jednoprzerwowego dwukolumnowego, zaś na Fot. 2.4 pokazano odłącznik dwuprzerwowy trójkolumnowy.

Odłączniki pionowe przeznaczone są zwykle do pracy w rozdzielniach najwyższych napięć. W stanie otwartym odłącznik taki stwarza widoczną przerwę między dwoma przewodami doprowadzającymi i szynami znajdującymi się na dwóch poziomach. Przykład odłącznika pionowego pantografowego przedstawiono na Fot. 2.5.



Fot. 2.3. Odłącznik poziomoobrotowy dwukolumnowy (jednoprzerwowy)
(<http://www.hapam.pl>).



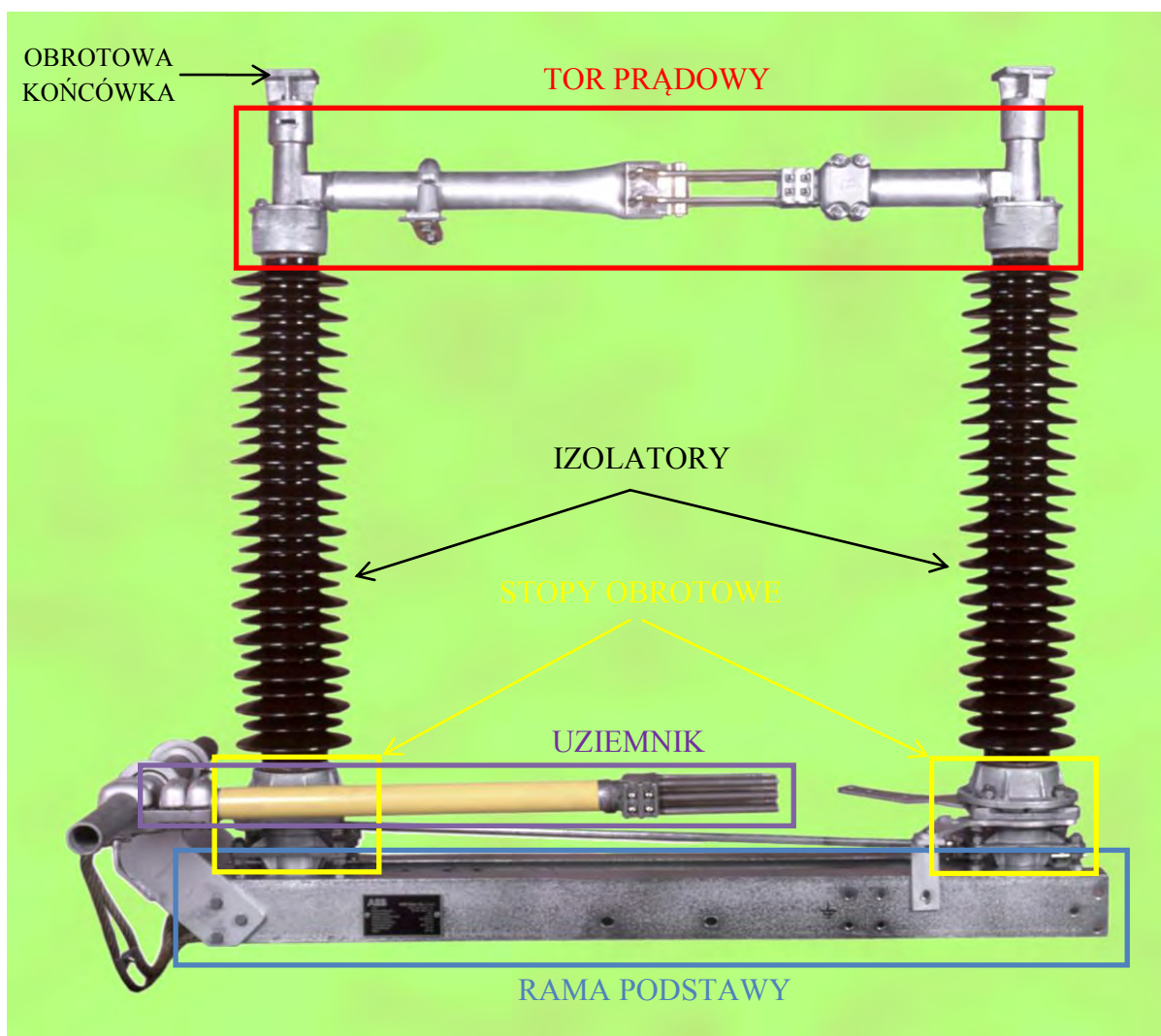
Fot. 2.4. Odłącznik poziomoobrotowy trójkolumnowy (dwuprzewowy)
(<http://www.hapam.pl>).



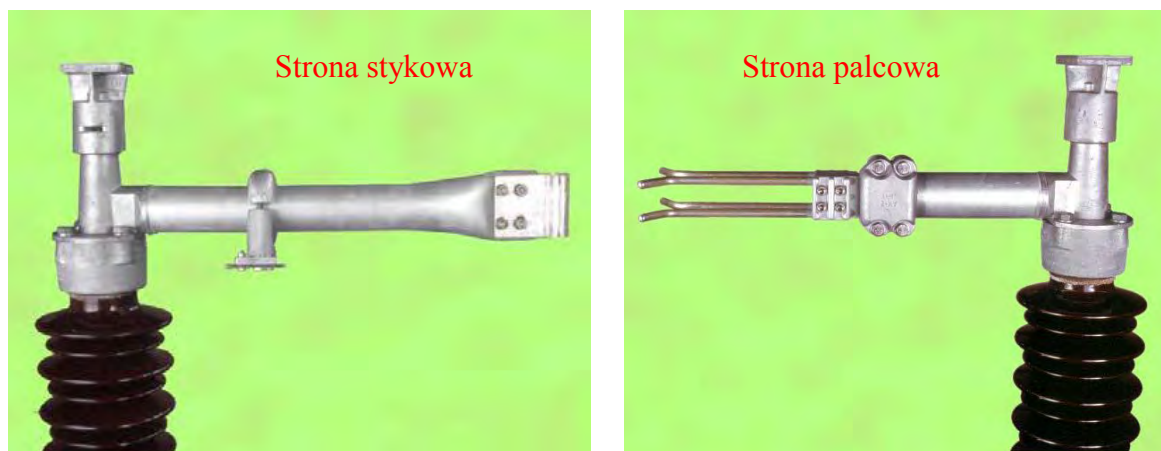
Fot. 2.5. Odłącznik pionowy pantografowy (<http://www.hapam.pl>).

2.5 Budowa i zasada działania odłączników dwukolumnowych

Odłączniki poziomoobrotowe dwukolumnowe mogą być stosowane w wielu rodzajach współczesnych stacji elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Schemat urządzenia, wraz z podziałem na jego główne elementy, przedstawiono na Rys. 2.3. Konstrukcję nośną odłącznika stanowi rama podstawy wykonana zwykle z kształtowników stalowych. Na ramie mocuje się obudowane stopy odłącznika. Są one osadzone na łożyskach kulkowych, zabezpieczonych przed wpływami atmosferycznymi i niewymagających zabiegów konserwacyjnych. Ceramiczne izolatory w postaci kolumn (zob. Pampuch 1977) umocowane są bezpośrednio na płycie stopy obrotowej. Stanowią one elementy wsporcze dla toru prądowego. Na szczycie kolumn znajdują się obrotowe końcówki z zaciskami, do których podłącza się przewody wysokiego napięcia. To rozwiązanie daje możliwość obrócenia zacisku o 360°, dzięki czemu można doprowadzić i przyłączyć przewód linii z dowolnego kierunku. Tor prądowy składa się z dwóch części: strony palcowej i strony stykowej (patrz Rys. 2.4). Wykonany jest on zwykle ze spawanych elementów aluminiowych, ograniczając liczbę połączeń śrubowych, które negatywnie wpływają na zmienność rezystancji stykowej.

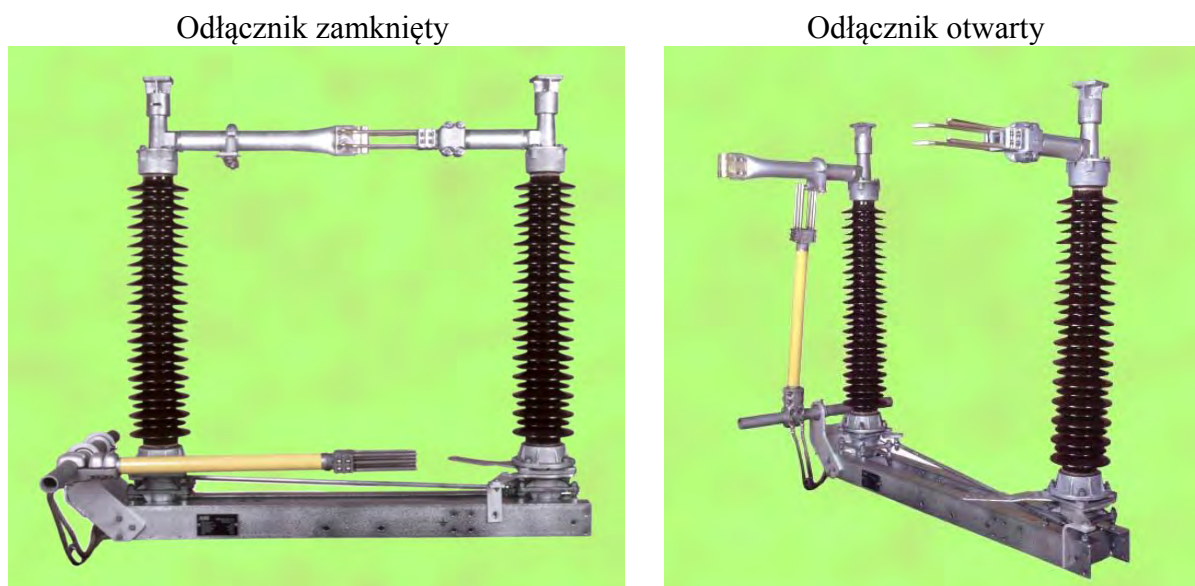


Rys. 2.3. Schemat odłącznika dwukolumnowego (<http://www.hapam.pl>).

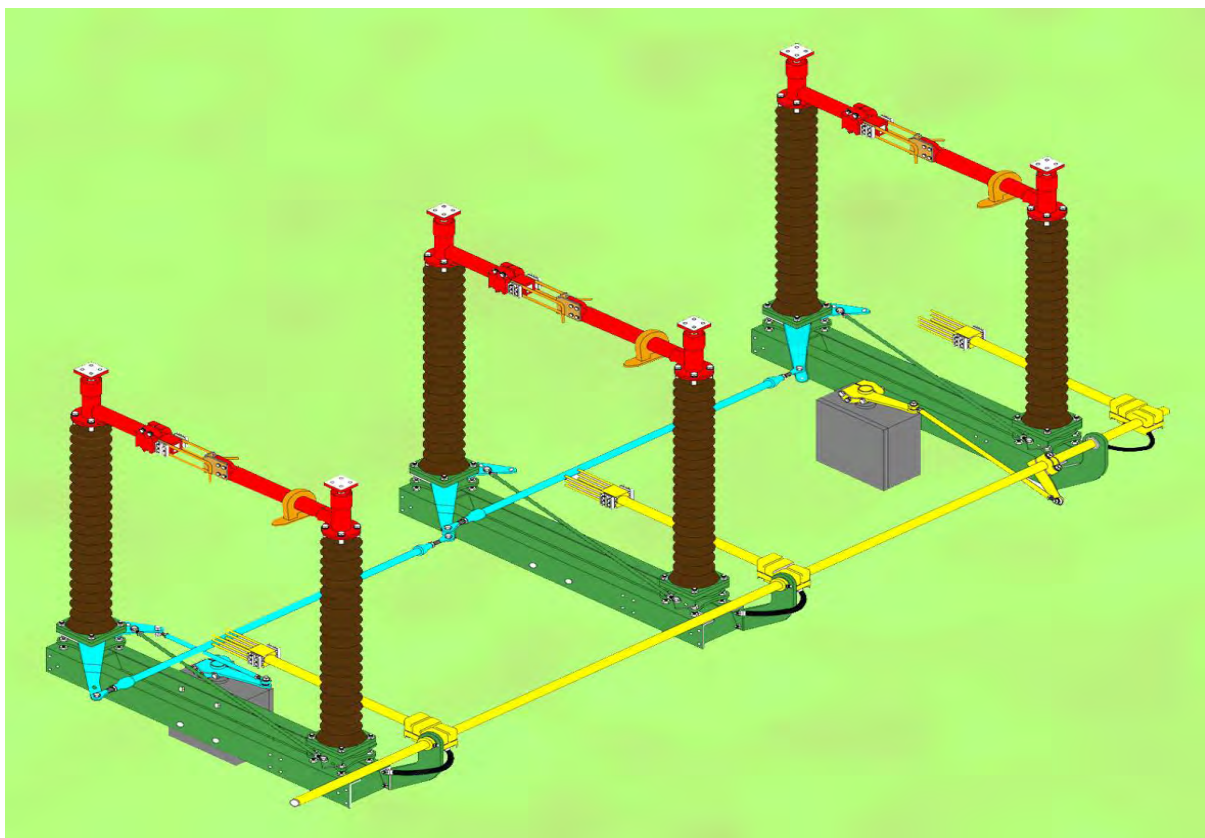


Rys. 2.4. Schemat toru prądowego odłącznika dwukolumnowego (<http://www.hapam.pl>).

Do ramy podstawy mocowany jest system uziemnika, który pełni bardzo ważną rolę w przypadku konfiguracji otwartej odłącznika uziemiając odłączony obwód (patrz Rys. 2.5 – odłącznik otwarty). Odłącznik i uziemnik są uruchamiane za pomocą oddzielnych napędów (patrz Rys. 2.6). Napędy odłączników i uziemników są tak zaprojektowane, że tuż przed osiągnięciem położeń krańcowych następuje przekroczenie punktu martwego, dzięki czemu działanie sił zewnętrznych (np. zwarcie, huragan, trzęsienie ziemi) nie może spowodować samoczynnego otwierania ani zamykania odłączników i uziemników. Energia pochodząca z napędu odłącznika przenoszona jest na stopę obrotową bieguna. Stopy każdego bieguna połączone są cięgłem przekątnym zapewniającym równoczesne uruchamianie. Podczas przestawiania obie części toru prądowego obracają się o kąt 90° i w stanie otwarcia odłącznika są one ustawione równoległe do siebie oraz prostopadle do ramy podstawy (patrz Rys. 2.5 – odłącznik otwarty). Odłączniki wysokiego napięcia zestawiane są często w układy składające się z trzech urządzeń (dla układów trójbiegunowych). Przykład takiego układu z zaznaczonymi oddzielnymi systemami napędów dla odłączników i uziemników przedstawiono na Rys. 2.6.



Rys. 2.5. Odłącznik dwukolumnowy w pozycji zamkniętej i otwartej (<http://www.hapam.pl>).

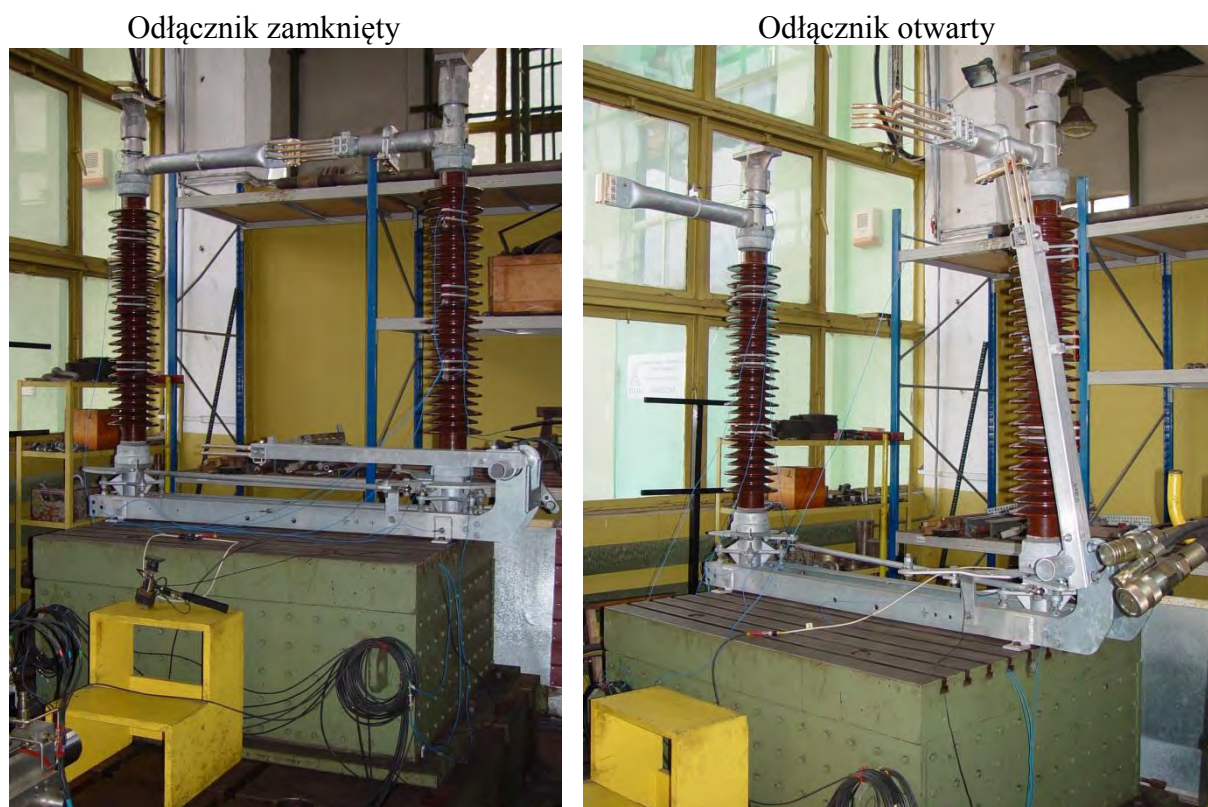


Rys. 2.6. Układ trzech odłączników wysokiego napięcia z zaznaczonymi oddzielnymi systemami napędów dla odłączników i uziemników (<http://www.hapam.pl>).

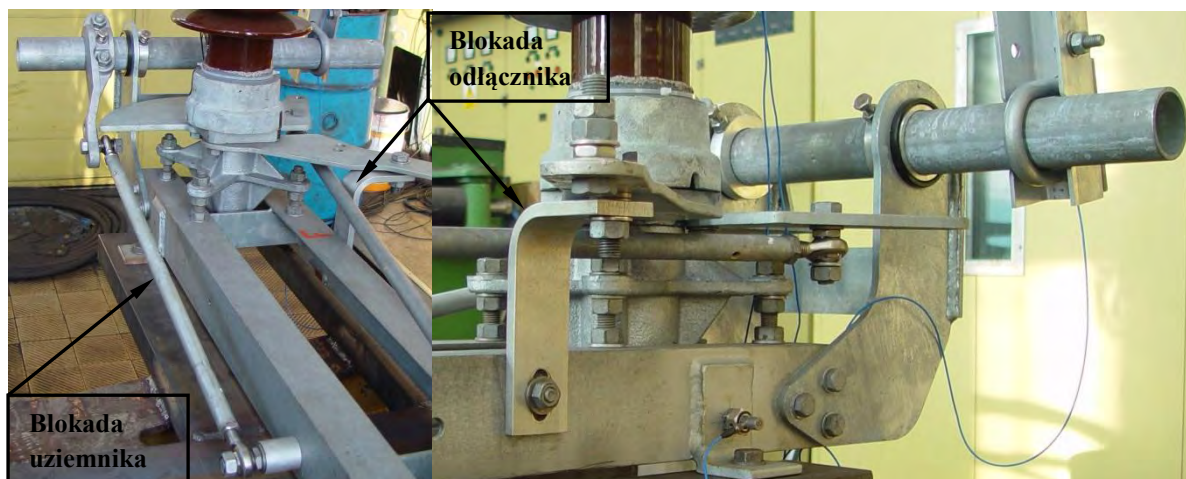
3 Badania eksperymentalne

3.1 Obiekt badań

Szczegółowym badaniom poddano odłącznik poziomoobrotowy dwukolumnowy o symbolu SGF 123 wyprodukowany przez firmę HAPAM Poland. Badany obiekt obejmuje jedno urządzenie zestawu trójbiegunowego bez napędu odłącznika i uziemnika. Konstrukcję odłącznika w pozycji zamkniętej oraz otwartej zaprezentowano na Fot. 3.1. Odłącznik składa się z dwóch kolumn ceramicznych (izolatorów) z niesymetrycznym torem prądowym oraz głowicami obrotowymi, jako najwyższymi punktami konstrukcji, a położenie uziemnika zakłóca jego symetrię. Uziemnik zmienia swoje położenie stosownie do pozycji pracy odłącznika (patrz Fot. 3.1 – odłącznik otwarty). Pozycję zamkniętą i otwartą obwodu odłącznika, wraz z obwodem uziemnika, realizuje się przez odpowiednie ustawienie i zablokowanie odłącznika blokadą, a uziemnika drążkami (patrz Fot. 3.2). Blokadę odłącznika w pozycji zamkniętej i otwartej zapewnia kątownik o grubości 10 mm. Blokadę uziemnika w pozycji zamkniętej umożliwia drążek uziemnika o długości 713 mm, natomiast w pozycji otwartej drążek o długości 950 mm.



Fot. 3.1. Konstrukcja odłącznika w pozycji zamkniętej oraz otwartej.



Fot. 3.2. Blokady odłącznika i uziemnika.

3.2 Badania impulsowe na sztywnym fundamencie

W pierwszym etapie wykonano szereg badań impulsowych po zamocowaniu odłącznika do sztywnego fundamentu. Odłącznik przykręcono czterema śrubami M14 do żeliwnej platformy stanowiącej górny element stalowo-betonowego fundamentu o łącznej masie trzech ton (zob. Fot. 3.1) dokręcając śruby kluczem dynamometrycznym (moment dokręcenia 120 Nm). Stalowo-betonowy fundament zamocowano sześcioma śrubami M24 do żeliwnej platformy o masie siedmiu ton przyspawanej do konstrukcji szynowej zatopionej w betonowej posadzce.

3.2.1 Warianty pomiarowe

Odłącznik podzielono na kolumnę I i kolumnę II (zob. Rys. 3.1). Punkty przyłożenia impulsu siły wyznaczono na górnych metalowych zakończeniach obu izolatorów, tuż poniżej kołnierzy toru prądowego. Pobudzenie drgań odłącznika impulsem siły (uderzeniem młotka modalnego) realizowane było w dwóch nawzajem prostopadłych kierunkach:

- Y – kierunek pobudzenia drgań poziomy poprzeczny
- X – kierunek pobudzenia drgań poziomy wzdłużny

Warianty pomiarowe nazwano:

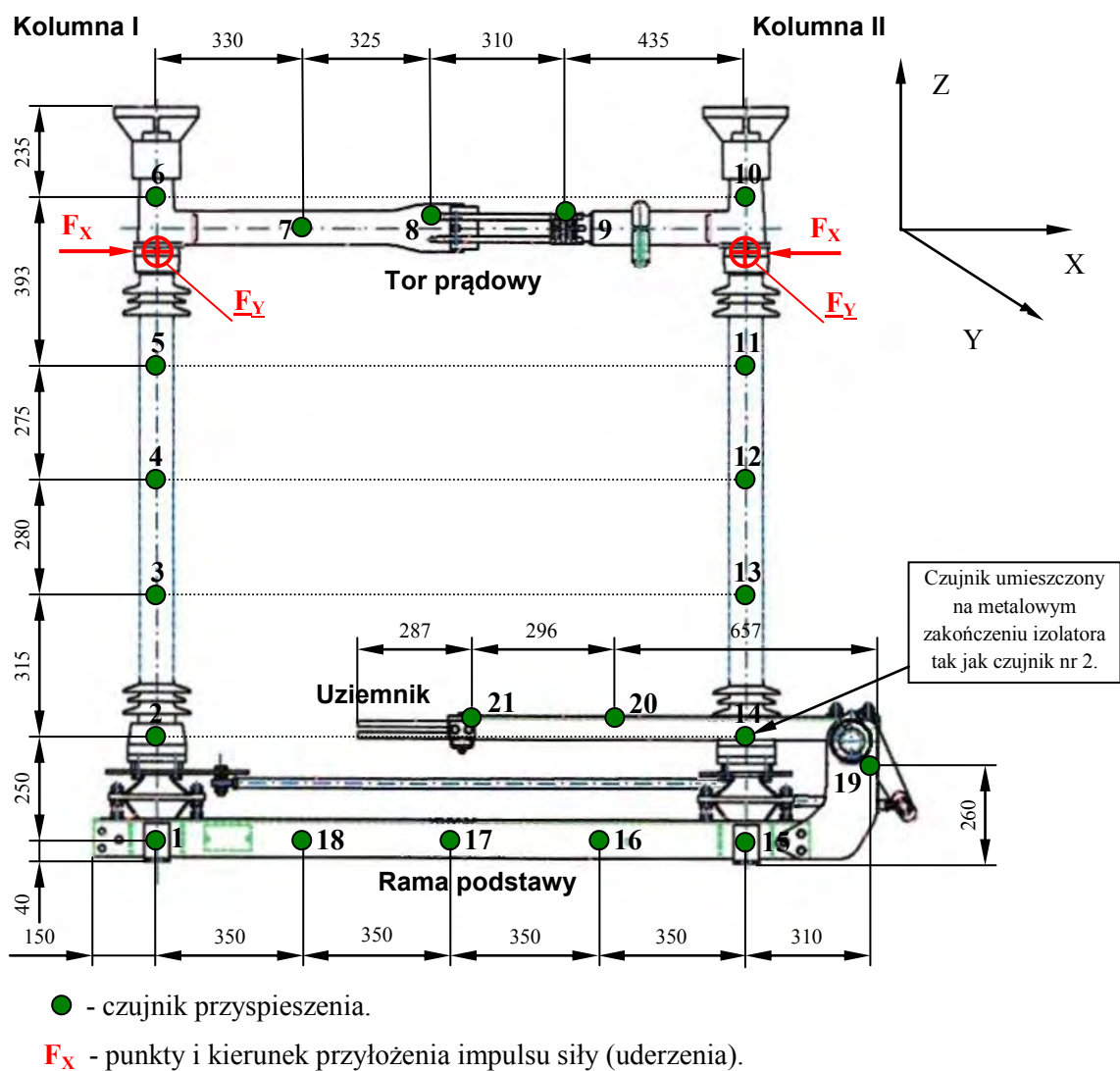
Kierunek pobudzenia drgań poziomy poprzeczny Y:

- odłącznik zamknięty - uderzenie w kolumnę I,
- odłącznik zamknięty - uderzenie w kolumnę II,
- odłącznik otwarty - uderzenie w kolumnę I,
- odłącznik otwarty - uderzenie w kolumnę II.

Kierunek pobudzenia drgań poziomy wzdłużny X:

- odłącznik zamknięty - uderzenie w kolumnę I,
- odłącznik zamknięty - uderzenie w kolumnę II,
- odłącznik otwarty - uderzenie w kolumnę I,
- odłącznik otwarty - uderzenie w kolumnę II.

Rozmieszczenie punktów pomiarowych wraz z punktami przyłożenia impulsu siły (uderzenia) przedstawiono na Rys 3.1.



Rys.3.1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i punktów przyłożenia impulsu siły (uderzenia) z podziałem odłącznika na kolumny.

Do realizacji pomiarów wytypowano:

- czujnik siły z młotkiem i podkładką elastyczną ograniczającą wymuszenie częstotliwości do 300 Hz,

- osiem jednokierunkowych czujników przyspieszeń z mechanicznym ograniczeniem częstotliwości do 4 kHz,
- dwunastokanałowy wzmacniacz z filtrem dolnoprzepustowym 1 kHz,
- dziewięć filtrów dolnoprzepustowych 500 Hz,
- analogowo-cyfrową kartę pomiarową,
- zestaw komputerowy do rejestracji pomiarów.

Schemat blokowy układu do pomiaru i rejestracji przedstawiono na Rys. 3.2.

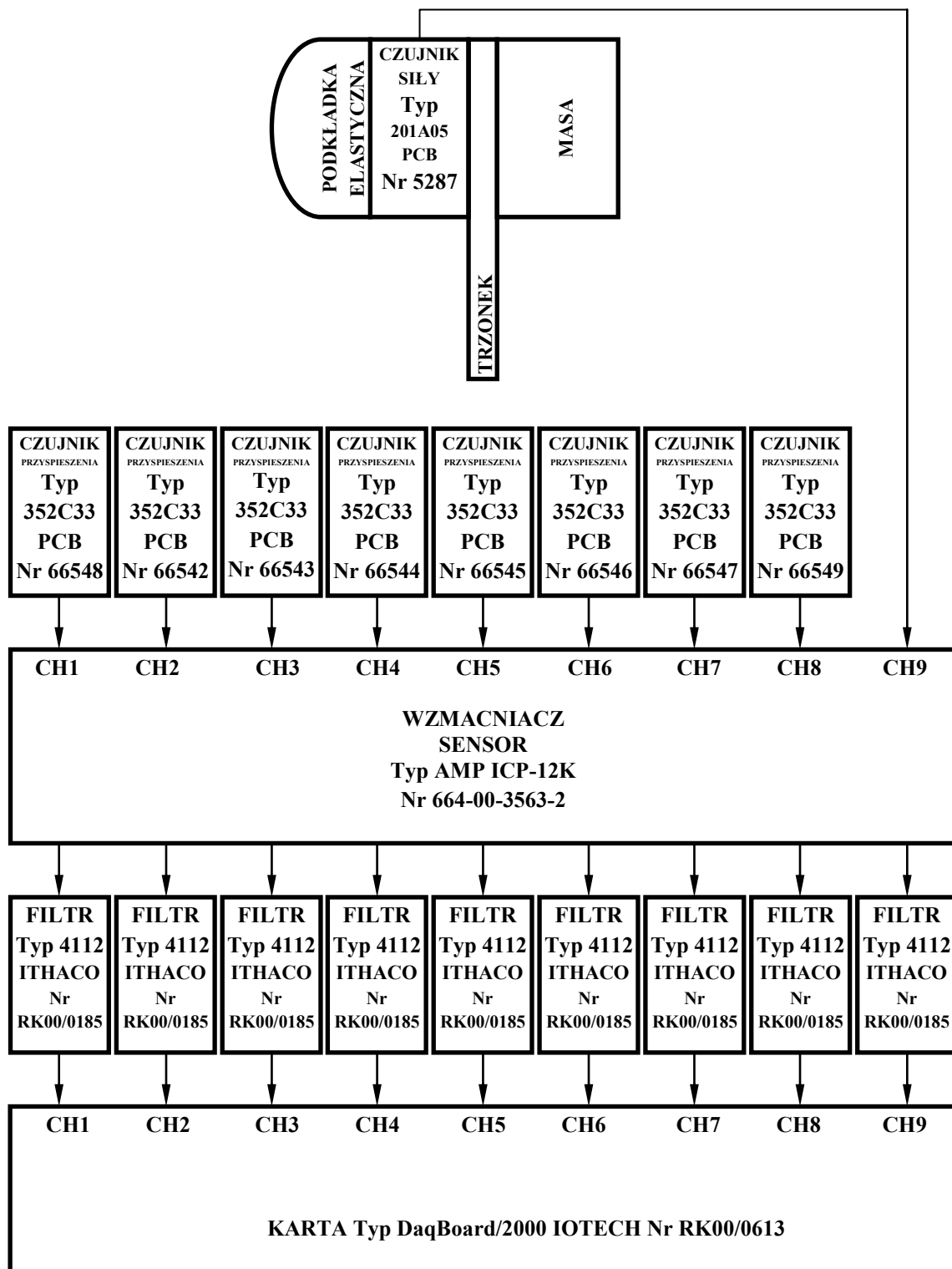
Przy realizacji badań impulsowych wykonano pomiary wartości amplitud przyspieszenia w punktach pomiarowych na odłączniku zadając uderzenie młotkiem z pomiarem amplitudy siły. Uderzenia wykonywano dla dwóch nawzajem prostopadłych kierunków Y i X w pozycji zamkniętej i otwartej odłącznika uderzając w kolumnę I, a po wygaśnięciu drgań w kolumnę II. Pomiary zarejestrowano z częstotliwością próbkowania 3 kHz dla czasu rejestracji 15 s i 45 s z jednoznacznym wygaśnięciem drgań. Po realizacji każdego z wariantów pomiarów nie stwierdzono uszkodzeń mechanicznych konstrukcji i wyposażenia odłącznika, a stan śrub mocujących odłącznik do fundamentu nie uległ zmianie.

3.2.2 Analiza modalna badań impulsowych

Sygnaly pomiarowe zarejestrowane podczas badań impulsowych odłącznika poddano wstępnej ocenie i obróbce, a następnie analizie modalnej. Wstępna ocena polegała na dokonaniu przeglądu zarejestrowanych sygnałów w poszczególnych kanałach pomiarowych oraz obliczonych na ich podstawie charakterystyk widmowych w celu sprawdzenia prawidłowości wykonania samych rejestracji oraz wybrania toku postępowania przy wstępnej obróbce (tzn. rodzaju i rzędu filtracji cyfrowej). Wstępna obróbka polegała na dokonaniu filtracji sygnałów pomiarowych filtrem dolnoprzepustowym typu FIR niezmiennającym fazy w celu odcięcia pasma częstotliwości, f , powyżej 50 Hz. W analizie modalnej wykonano obliczenia estymacyjne wstępnie obrobionych sygnałów pomiarowych, której efektem było wyznaczenie widmowej funkcji przejścia (inertancji) odłącznika w poszczególnych punktach pomiarowych oraz estymacja parametrów modalnych w rezonansach. Widmową funkcję przejścia (inertancję), $A(f)$, wyznaczono korzystając ze wzoru:

$$A(f) = \frac{\ddot{X}(f)}{F(f)} \quad (3.1)$$

gdzie $\ddot{X}(f)$ jest transformatą Fouriera odpowiedzi (zapis przyspieszeń) zaś $F(f)$ transformatą Fouriera siły wymuszającej.



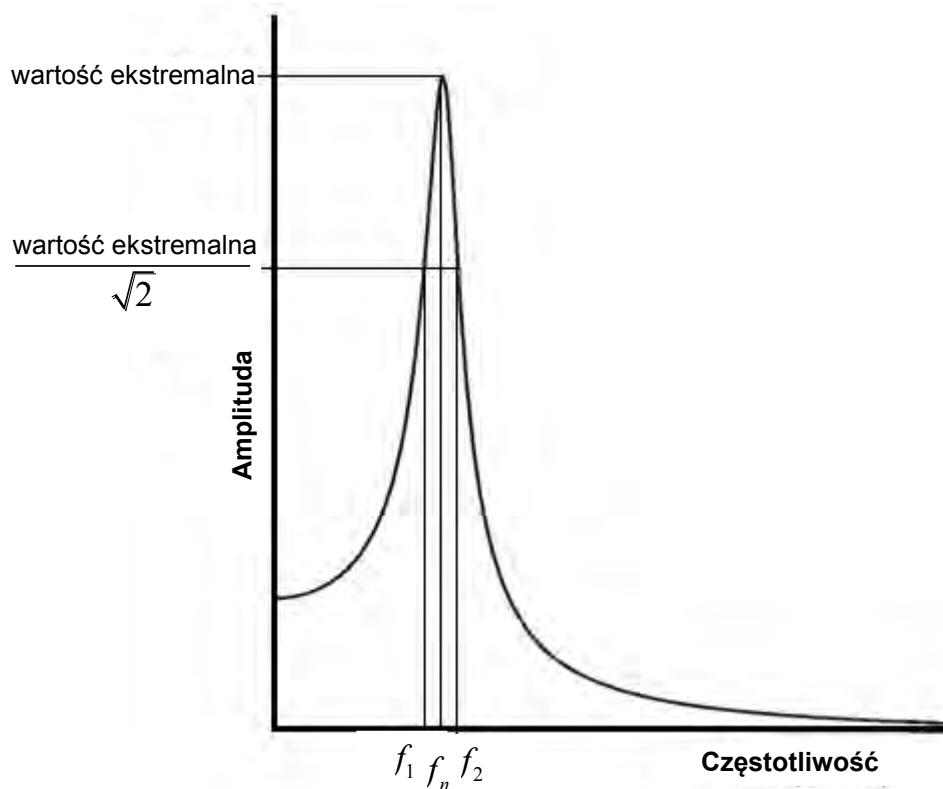
Rys. 3.2. Schemat blokowy układu do pomiaru i rejestracji.

W wyniku analizy modalnej otrzymano charakterystyki inertancji w dziedzinie częstotliwości $0 \div 50$ Hz i parametry modalne w rezonansach (Dorf 2005, Leyko 1997) dla poszczególnych punktów pomiarowych odłącznika. Tłumienie drgań określano stosując metodę połowy mocy, zgodnie z którą współczynnik tłumienia, ξ , opisany zależnością (Harris i Piersol 2002):

$$\xi = \frac{1}{2Q} \quad (3.2)$$

gdzie Q jest współczynnikiem dobroci, wyznaczyć można na podstawie wykresu odpowiedzi częstotliwościowej (patrz schemat na Rys. 3.3) korzystając ze wzoru (zob. np. Clough i Penzien 1993):

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \quad (3.3)$$



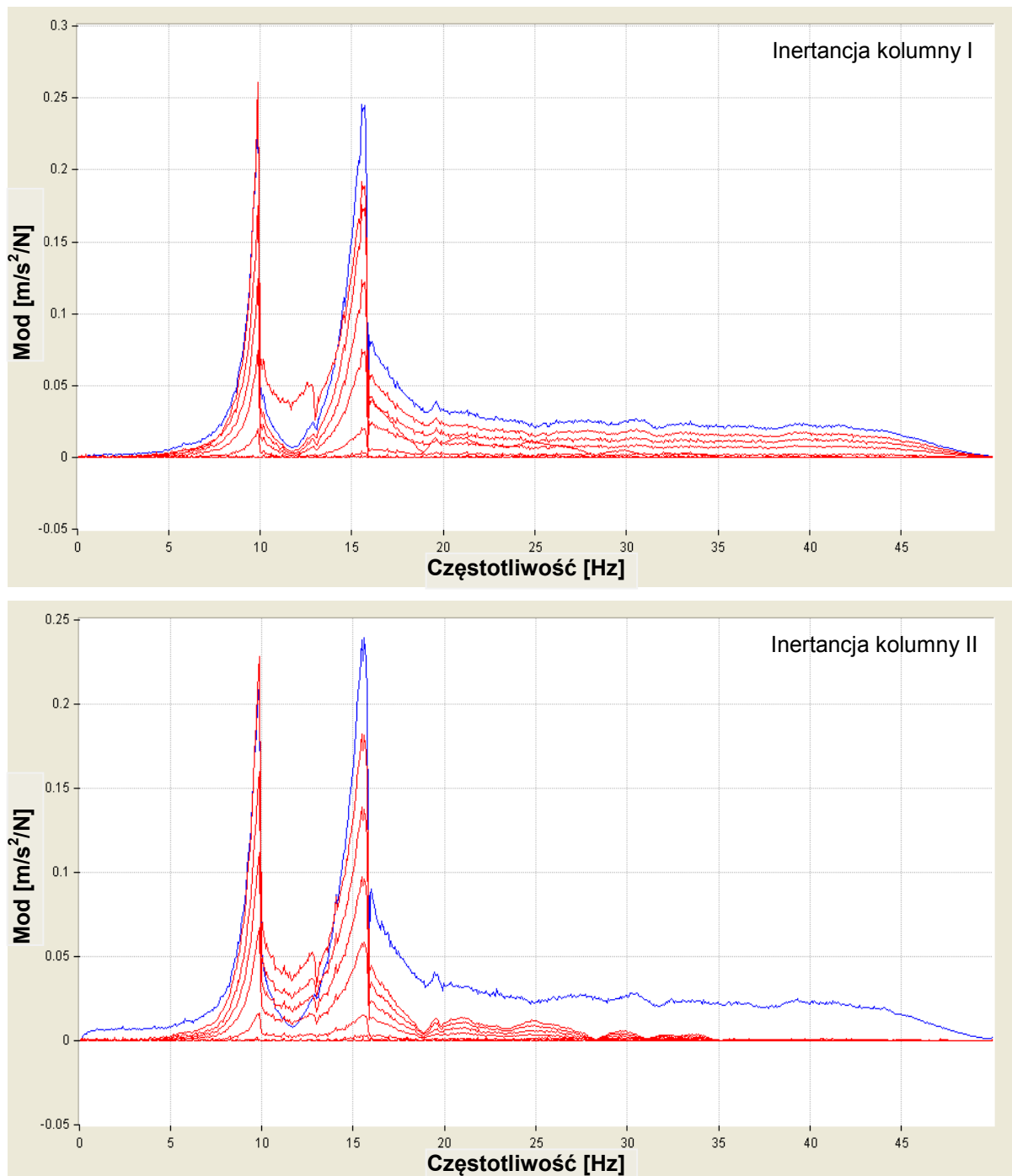
Rys. 3.3. Definicja parametrów w metodzie połowy mocy.

Przykłady wyników badań impulsowych dla odłącznika zamocowanego na sztywnym fundamencie przedstawiono na Rys. 3.4 - 3.67.

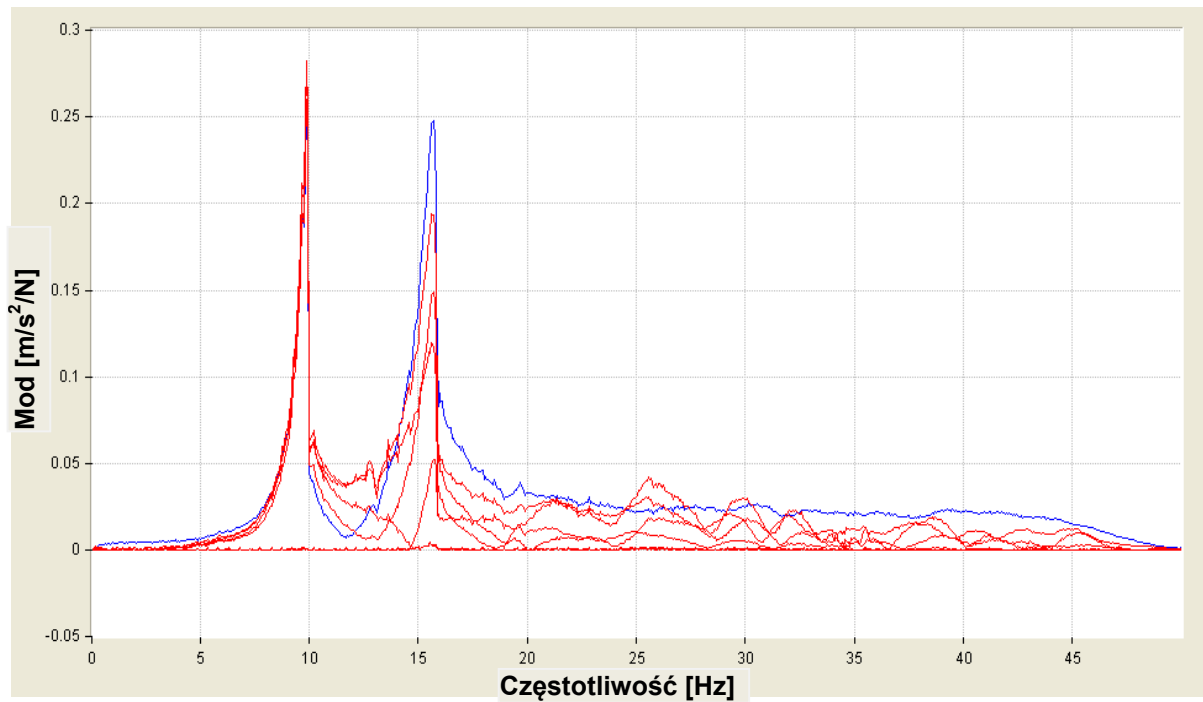
3.2.3 Wyniki analizy modalnej na sztywnym fundamencie

3.2.3.1 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę I

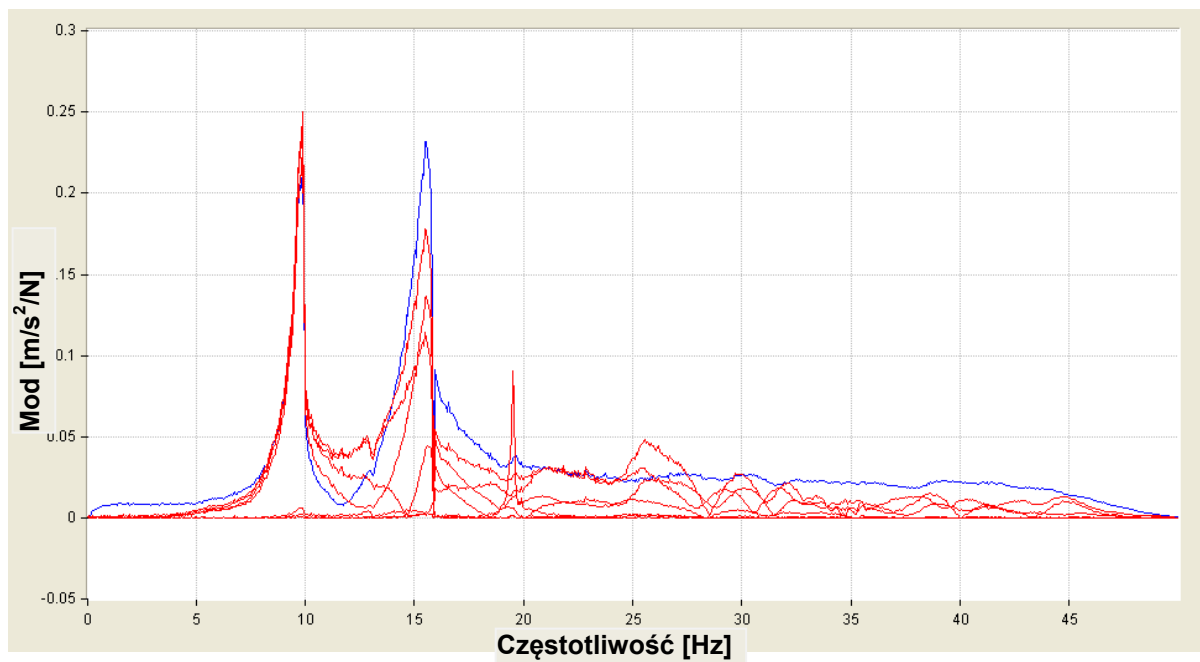
Na Rys. 3.4 - 3.6 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn, toru prądowego oraz ramy i uziemnika.



Rys. 3.4. Wykresy inertancji kolumn I i II.



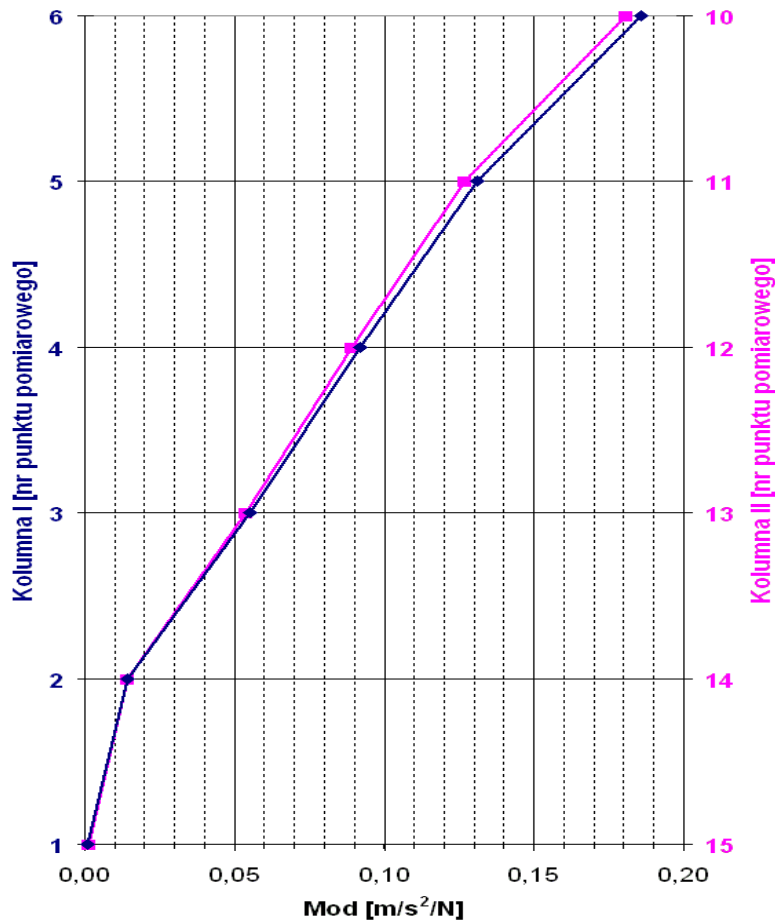
Rys. 3.5. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego.



Rys. 3.6. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych szczytów kolumn, rami i uziemnika.

3.2.3.1.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 9,83$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 9,83$ Hz przedstawiono na Rys. 3.7.



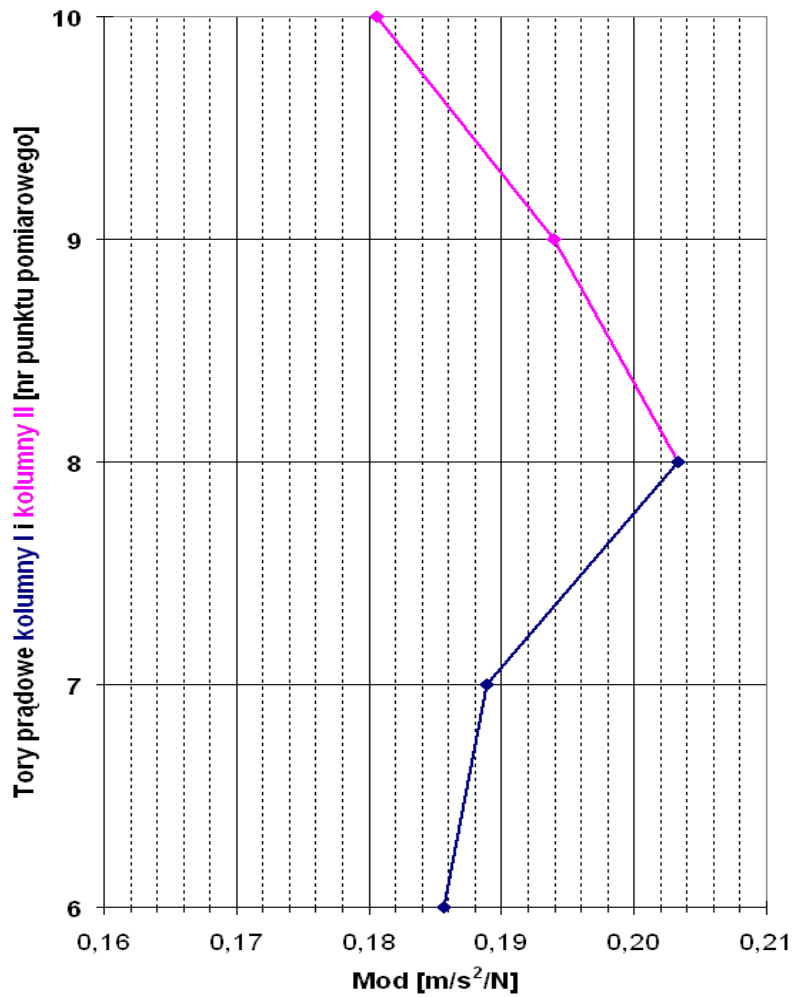
Rys. 3.7. Forma drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz.

Tabela 3.1 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	0,000844	36,4	1,37%	15Y	0,001263	28,7	1,74%
2Y	0,014198			14Y	0,014381		
3Y	0,055377			13Y	0,054010		
4Y	0,091734			12Y	0,089071		
5Y	0,131219			11Y	0,126928		
6Y	0,185660			10Y	0,180573		

Tabela 3.1. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tor prądowy jest w rezonansie. Formę drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,83$ Hz przedstawiono na Rys. 3.8.



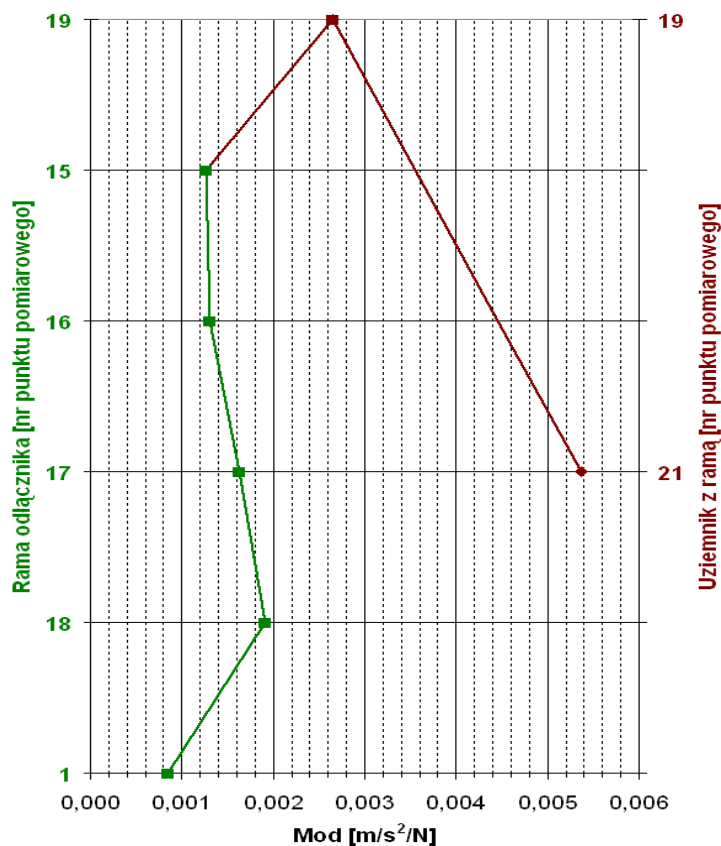
Rys. 3.8. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,83$ Hz.

Tabela 3.2 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
6Y	0,185660	29,3	1,71%
7Y	0,188836		
8Y	0,203310		
9Y	0,193906		
10Y	0,180573		

Tabela 3.2. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika nie jest w rezonansie, są to drgania w sprzężeniu. Natomiast rama uziemnika oraz uziemnik są w rezonansie. Formę drgań ramy i uziemnika dla $f_{R1} = 9,83$ Hz przedstawiono na Rys. 3.9.



Rys. 3.9. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 9,83$ Hz.

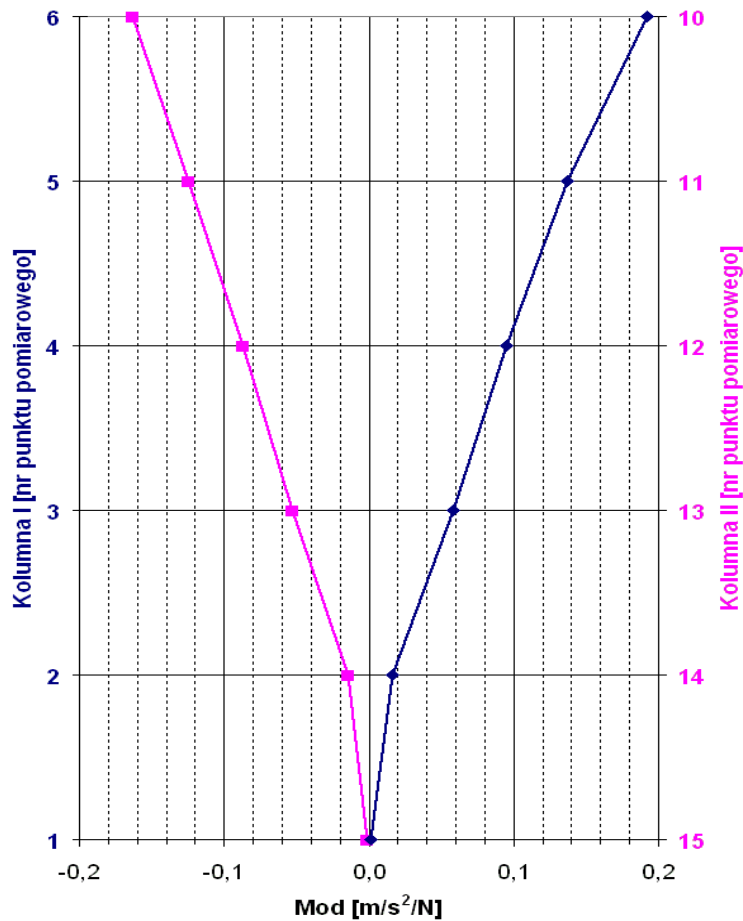
Tabela 3.3 prezentuje zestawienie formy drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Współczynnik			Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik mod [m/s ² /N]	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ			dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika				21Y	0,005362	28,4	1,76%
1Y	0,000844	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy				
18Y	0,001908						
17Y	0,001629						
16Y	0,001302						
15Y	0,001263						
Rama uziemnika				19Y	0,002651		

Tabela 3.3. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.1.2 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 15,58 \text{ Hz}$

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R2} = 15,58 \text{ Hz}$ przedstawiono na Rys. 3.10.



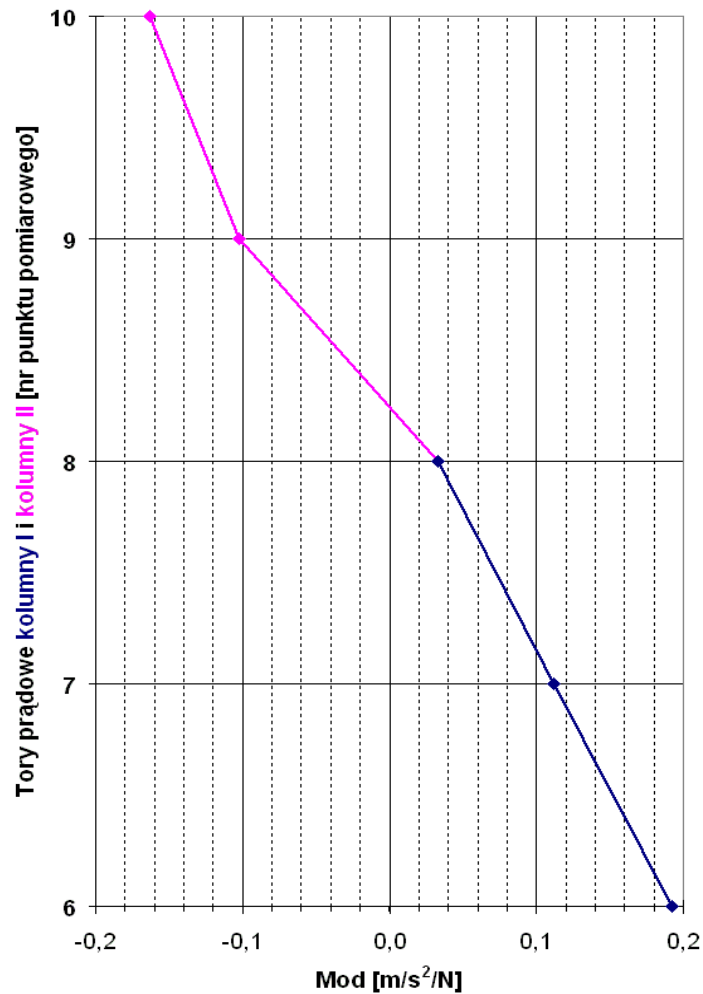
Rys. 3.10. Forma drgań dla $f_{R2} = 15,58 \text{ Hz}$.

Tabela 3.4 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R2} = 15,58 \text{ Hz}$ wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	0,001567	25,2	1,98%	15Y	-0,001349	19,5	2,57%
2Y	0,015952			14Y	-0,014006		
3Y	0,058084			13Y	-0,052650		
4Y	0,095107			12Y	-0,086709		
5Y	0,136856			11Y	-0,124393		
6Y	0,192473			10Y	-0,163445		

Tabela 3.4. Zestawienie formy drgań kolumn dla $f_{R2} = 15,58 \text{ Hz}$ wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tor prądowy jest w rezonansie. Formę drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 15,58$ Hz przedstawiono na Rys. 3.11.



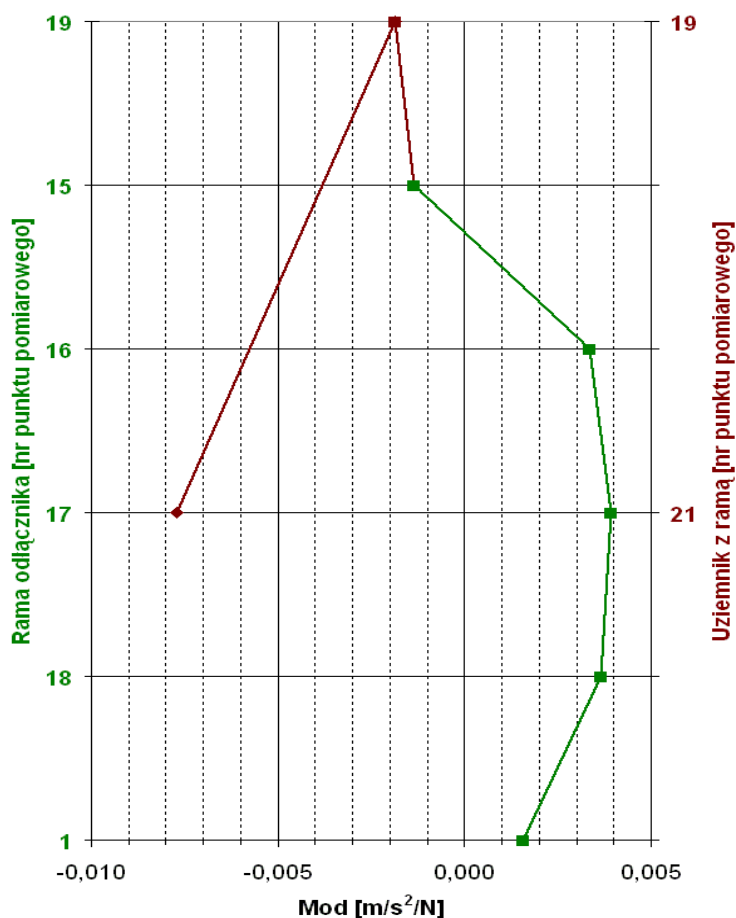
Rys. 3.11. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 15,58$ Hz.

Tabela 3.5 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 15,58$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
6Y	0,192473	24,2	2,07%
7Y	0,111804		
8Y	0,032927		
9Y	-0,102706		
10Y	-0,163445		

Tabela 3.5. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 15,58$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika, rama uziemnika oraz uziemnik są w rezonansie. Formę drgań rami i uziemnika dla $f_{R2} = 15,58$ Hz przedstawiono na Rys. 3.12.



Rys. 3.12. Forma drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R2} = 15,58$ Hz.

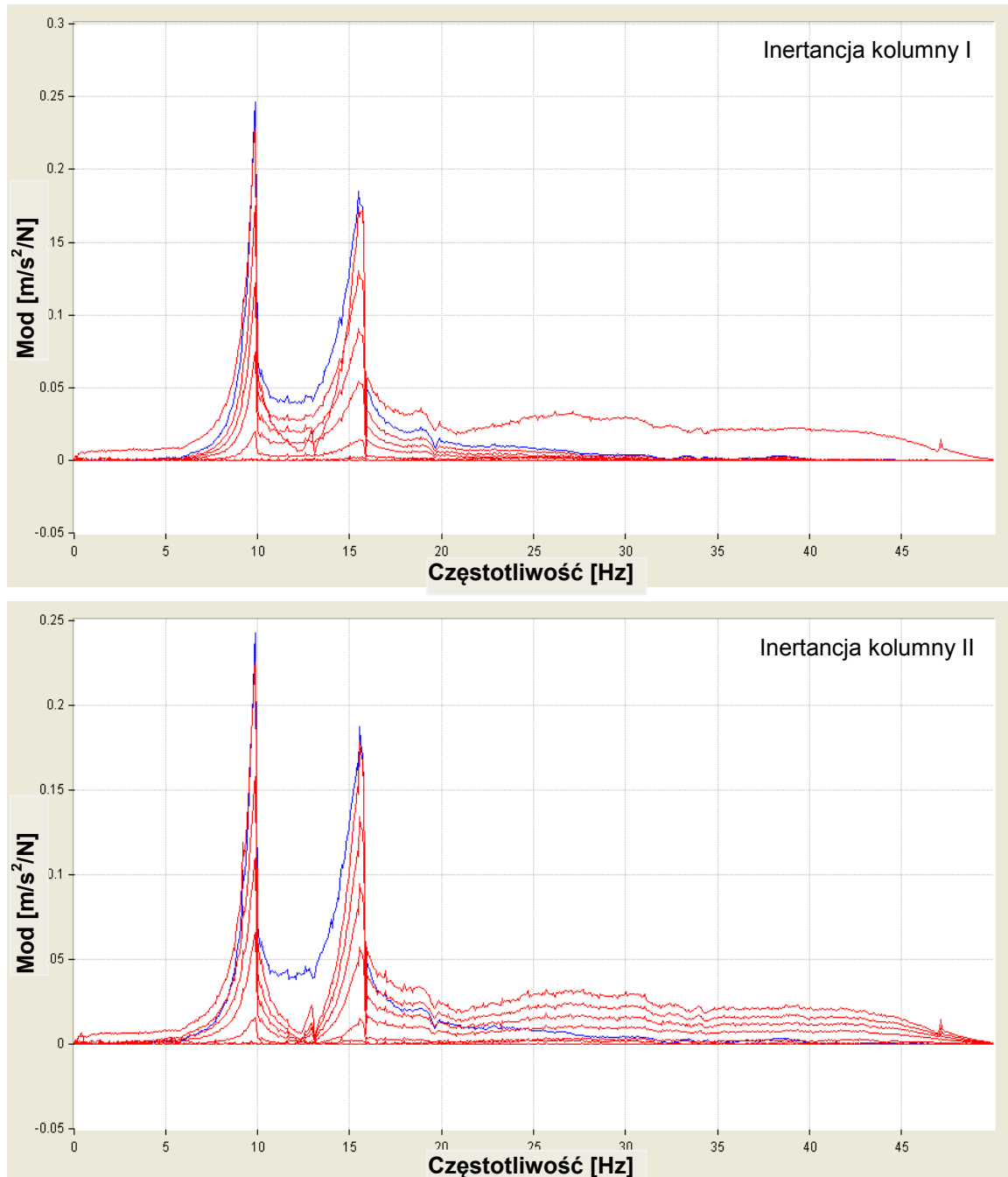
Tabela 3.6 prezentuje zestawienie formy drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R2} = 15,58$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Współczynnik			Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik mod [m/s ² /N]	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ			dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika				21Y	-0,007725	80,9	0,62%
1Y	0,001567	53,4	0,94%				
18Y	0,003643						
17Y	0,003936						
16Y	0,003339						
15Y	-0,001349						
Rama uziemnika				19Y	-0,001846		
19Y	-0,001846	66,7	0,75%				

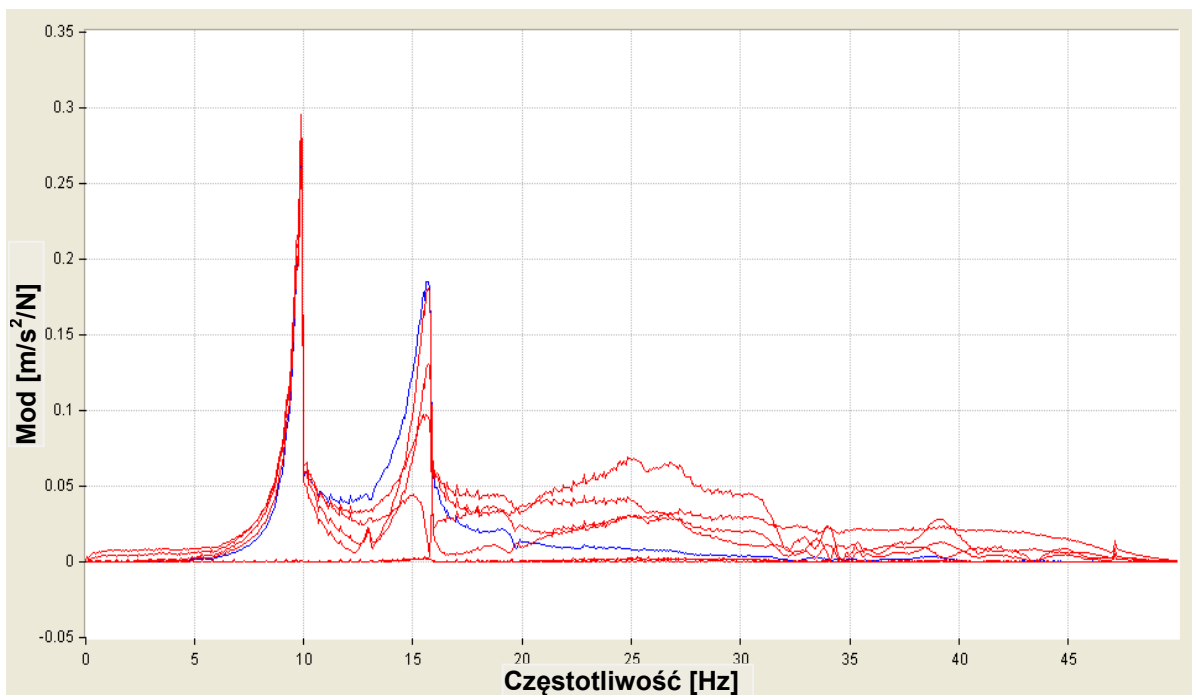
Tabela 3.6. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 15,58$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.2 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę II

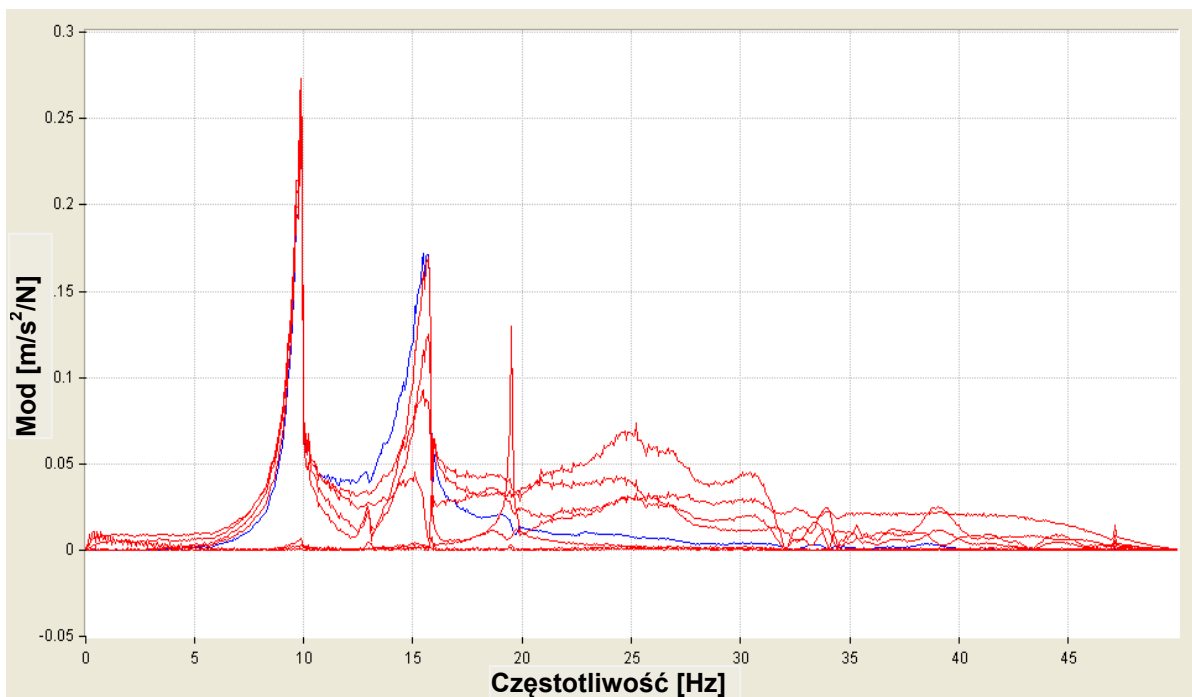
Na Rys. 3.13 - 3.15 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn, toru prądowego oraz ramy i uziemnika.



Rys. 3.13. Wykresy inertancji kolumn I i II.



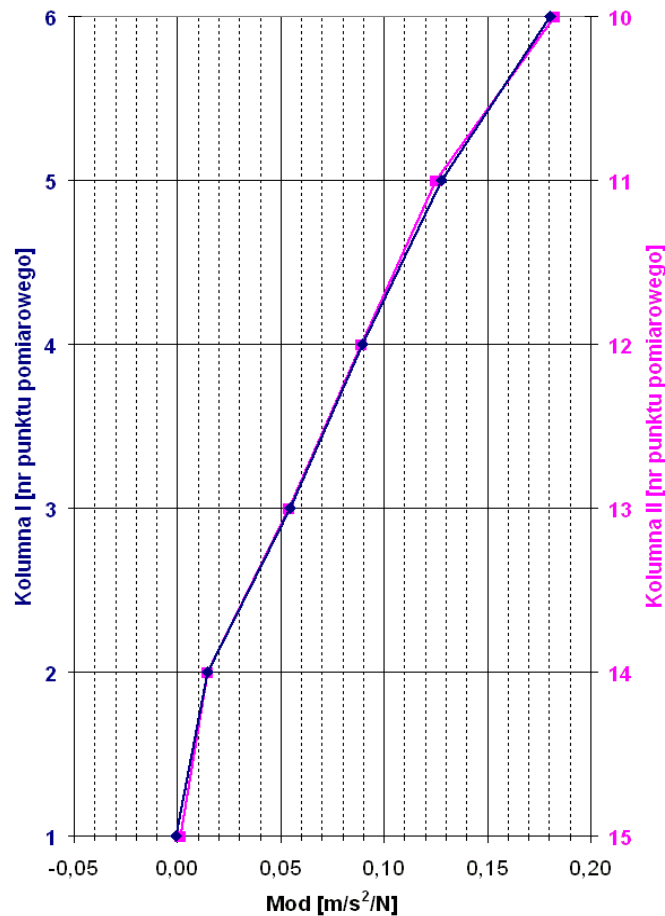
Rys. 3.14. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego.



Rys. 3.15. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych szczytów kolumn, ramy i uziemnika.

3.2.3.2.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 9,83$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 9,83$ Hz przedstawiono na Rys. 3.16.



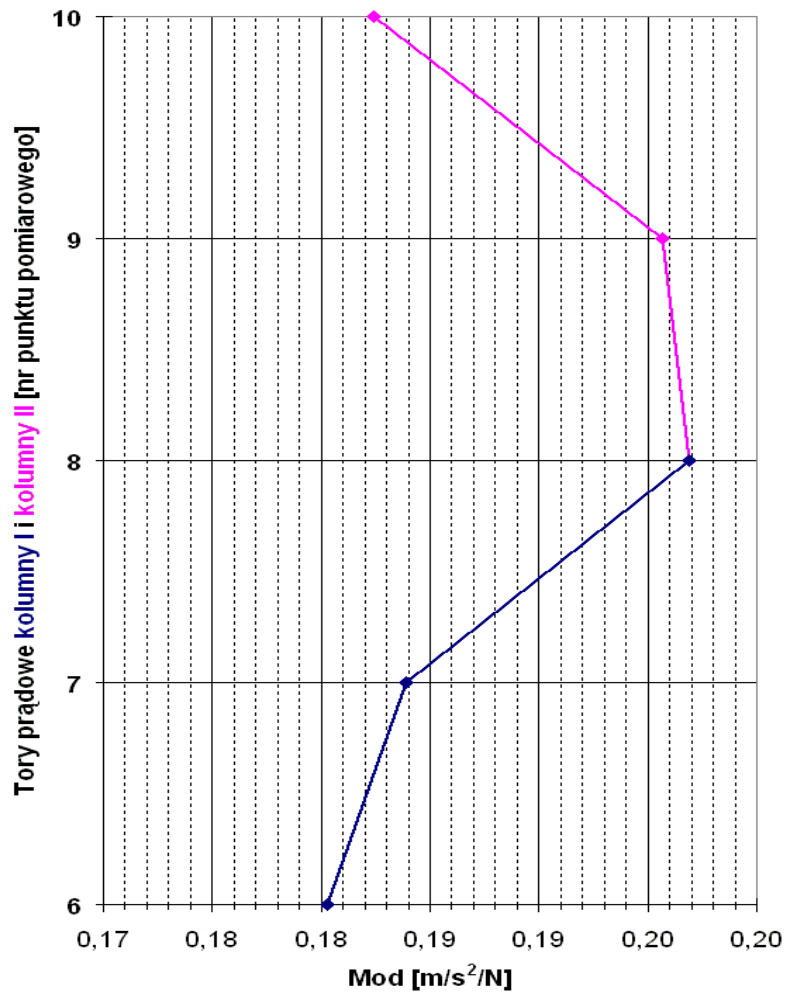
Rys. 3.16. Forma drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz.

Tabela 3.7 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	-0,000583	35,0	1,43%	15Y	0,001523	26,6	1,88%
2Y	0,014787			14Y	0,014372		
3Y	0,054395			13Y	0,053733		
4Y	0,089373			12Y	0,088774		
5Y	0,127876			11Y	0,125206		
6Y	0,180295			10Y	0,182387		

Tabela 3.7. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 9,83$ Hz przedstawiono na Rys. 3.17.



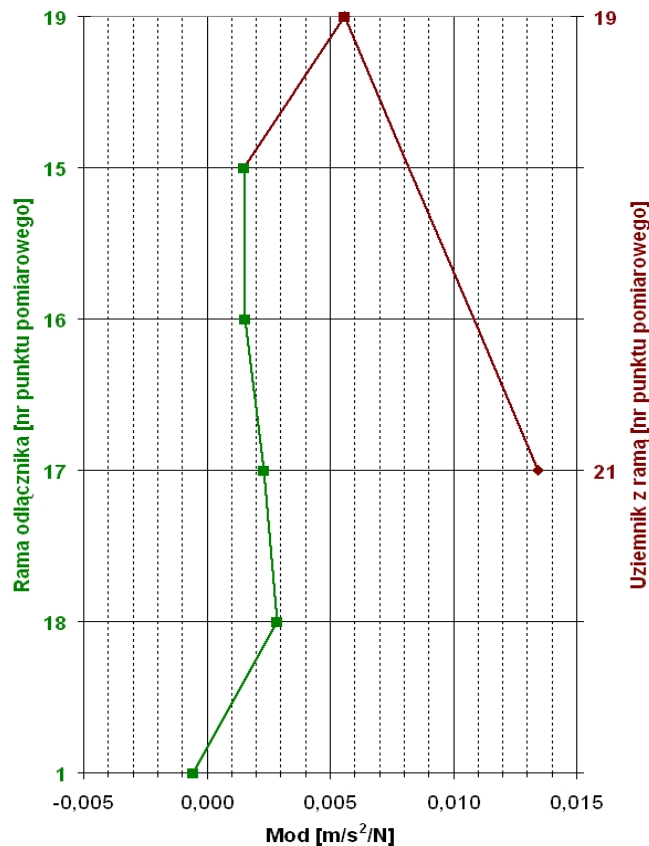
Rys. 3.17. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,83$ Hz.

Tabela 3.8 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
6Y	0,180295	32,4	1,54%
7Y	0,183878		
8Y	0,196906		
9Y	0,195651		
10Y	0,182387		

Tabela 3.8. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika nie jest w rezonansie, są to drgania w sprzężeniu. Natomiast rama uziemnika oraz uziemnik są w rezonansie. Formę drgań ramy i uziemnika dla $f_{R1} = 9,83$ Hz przedstawiono na Rys. 3.18.



Rys. 3.18. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 9,83$ Hz.

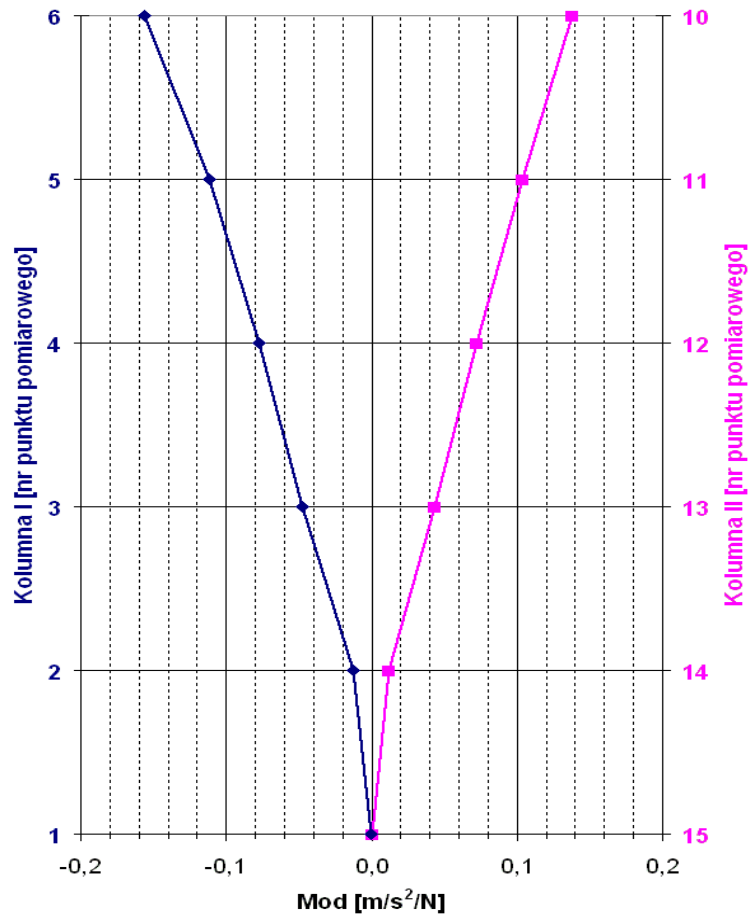
Tabela 3.9 prezentuje zestawienie formy drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Współczynnik			Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik mod [m/s ² /N]	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ			dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika				21Y	0,013437	48,2	1,04%
1Y	-0,000583	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy				
18Y	0,002858						
17Y	0,002313						
16Y	0,001563						
15Y	0,001523						
Rama uziemnika				19Y	0,005580		

Tabela 3.9. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,83$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.2.2 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 15,52$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R2} = 15,52$ Hz przedstawiono na Rys. 3.19.



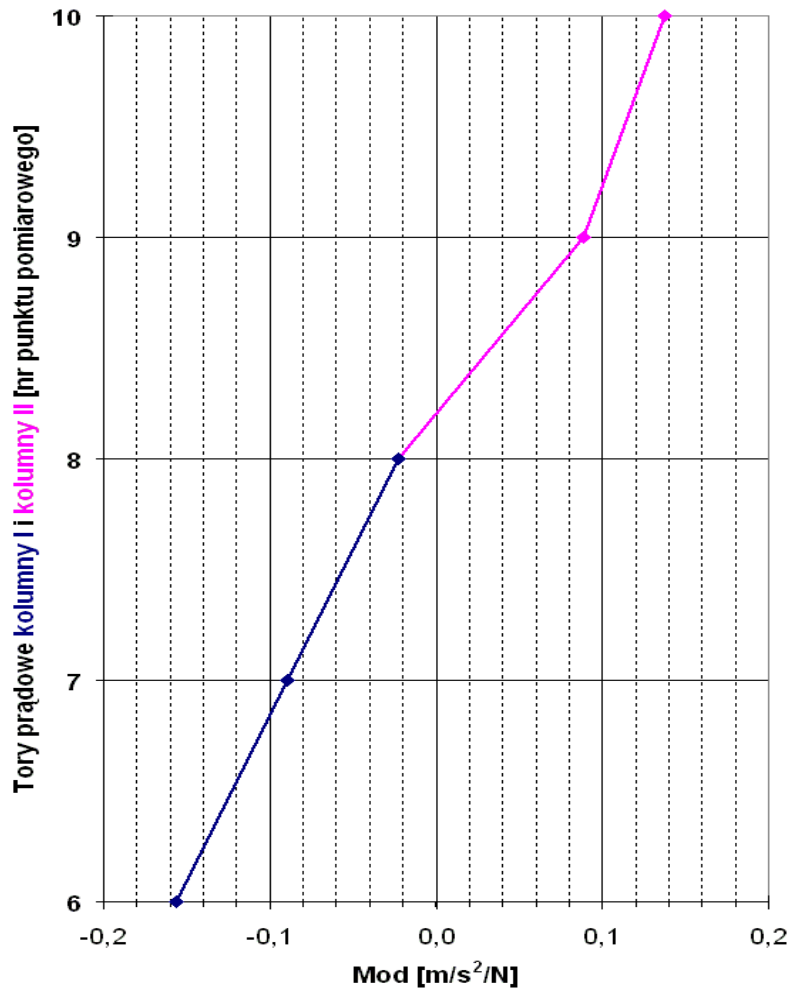
Rys. 3.19. Forma drgań dla $f_{R2} = 15,52$ Hz.

Tabela 3.10 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R2} = 15,52$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	0,000844	36,4	1,37%	15Y	0,001263	28,7	1,74%
2Y	0,014198			14Y	0,014381		
3Y	0,055377			13Y	0,054010		
4Y	0,091734			12Y	0,089071		
5Y	0,131219			11Y	0,126928		
6Y	0,185660			10Y	0,180573		

Tabela 3.10 Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 15,52$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowy jest w rezonansie. Formę drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 15,52$ Hz przedstawiono na Rys. 3.20.



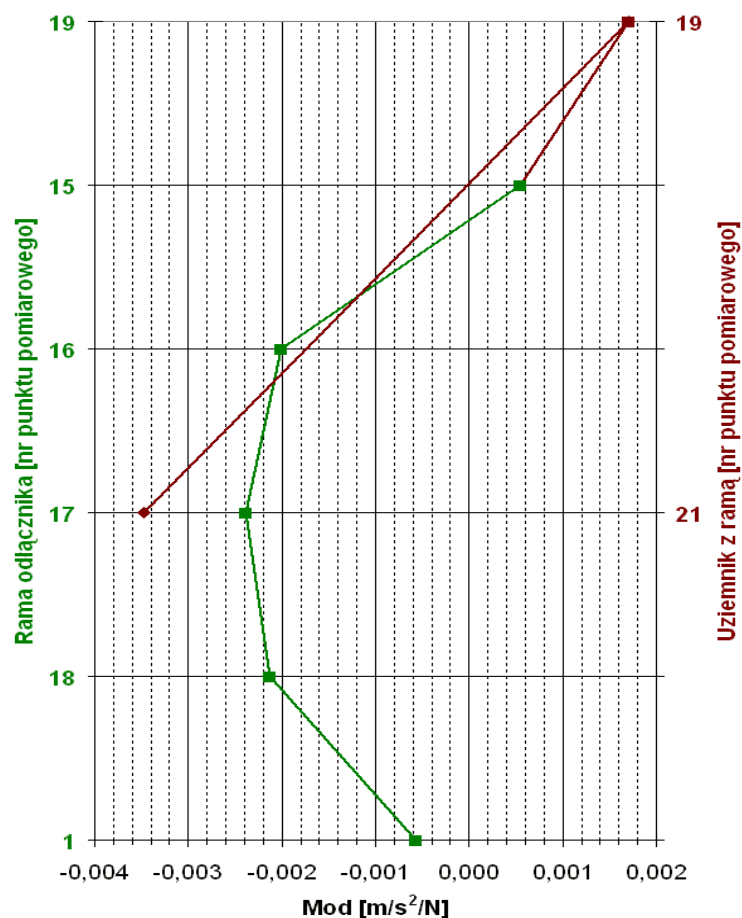
Rys. 3.20. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 15,52$ Hz.

Tabela 3.11 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 15,52$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
6Y	-0,156353	19,5	2,56%
7Y	-0,089795		
8Y	-0,022863		
9Y	0,088602		
10Y	0,137584		

Tabela 3.11. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 15,52$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika, rama uziemnika oraz uziemnik są w rezonansie. Formę drgań rami i uziemnika dla $f_{R2} = 15,52$ Hz przedstawiono na Rys. 3.21.



Rys. 3.21. Forma drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R2} = 15,52$ Hz.

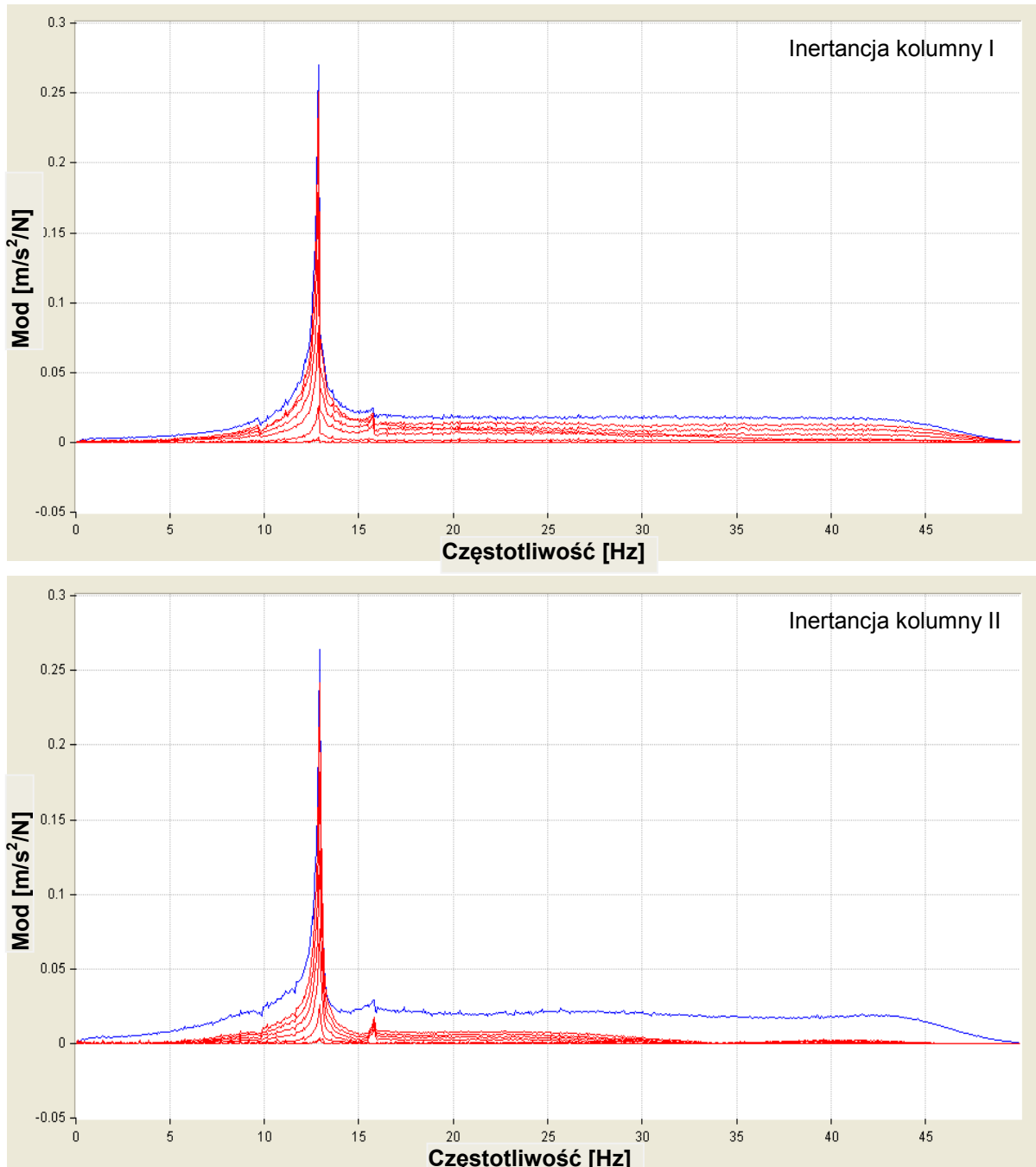
Tabela 3.12 prezentuje zestawienie formy drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R2} = 15,52$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Współczynnik			Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik [m/s ² /N]	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ			dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika				21Y	-0,003469	125,5	0,40%
1Y	-0,000573	77,8	0,64%				
18Y	-0,002129						
17Y	-0,002389						
16Y	-0,002005						
15Y	0,000551						
Rama uziemnika				19Y	0,001701		
19Y	0,001701	123,7	0,40%	19Y	0,001701		

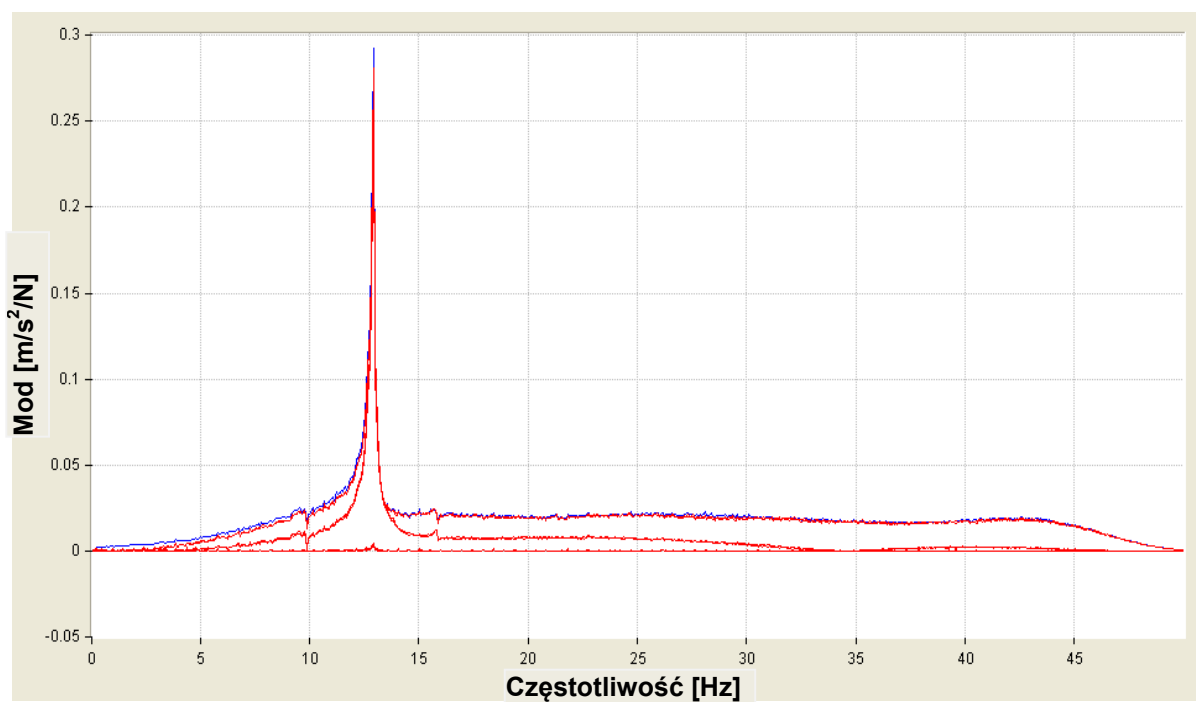
Tabela 3.12. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 15,52$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.3 Kierunek pobudzenia drgań wzdluzny X, odlacznik zamkniety, uderzenie w kolumnę I

Na Rys. 3.22 - 3.23 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn oraz toru prądowego.



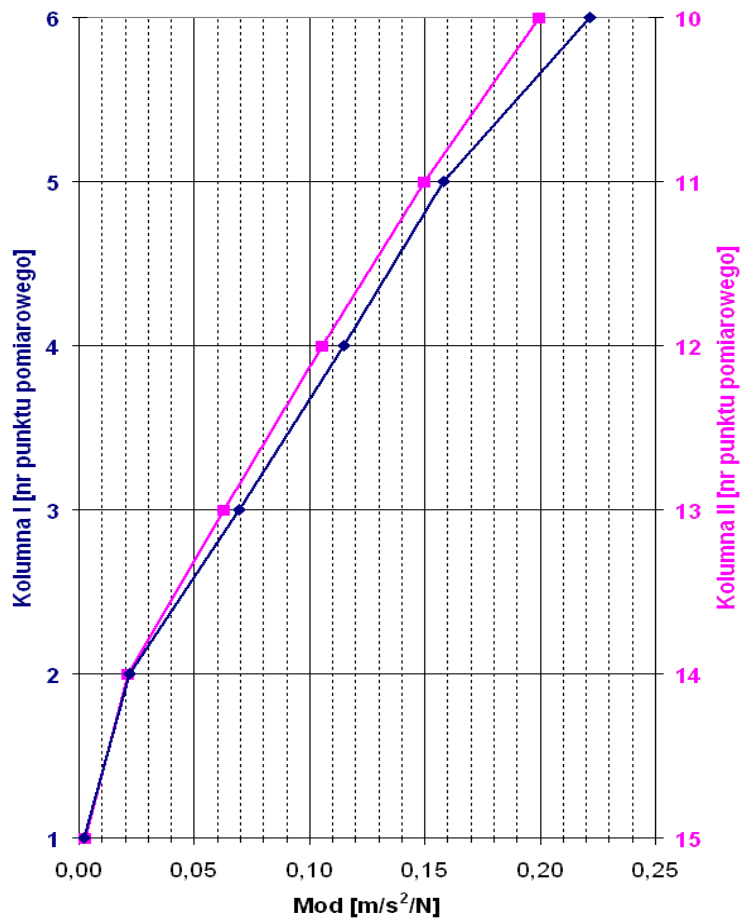
Rys. 3.22. Wykresy inertancji kolumn I i II.



Rys. 3.23. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego.

3.2.3.3.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 12,93$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 12,93$ Hz przedstawiono na Rys. 3.24.



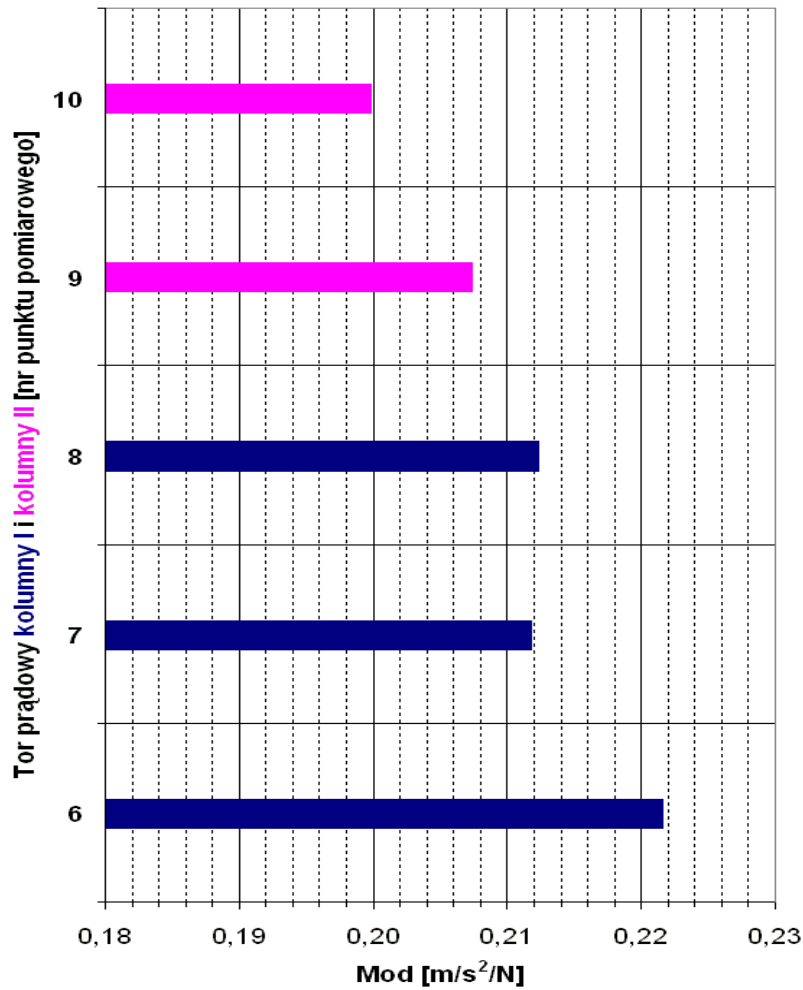
Rys. 3.24. Forma drgań dla $f_{R1} = 12,93$ Hz.

Tabela 3.13 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	-0,000583	35,0	1,43%	15Y	0,001523	26,6	1,88%
2Y	0,014787			14Y	0,014372		
3Y	0,054395			13Y	0,053733		
4Y	0,089373			12Y	0,088774		
5Y	0,127876			11Y	0,125206		
6Y	0,180295			10Y	0,182387		

Tabela 3.13. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 12,93$ Hz przedstawiono na Rys. 3.25.



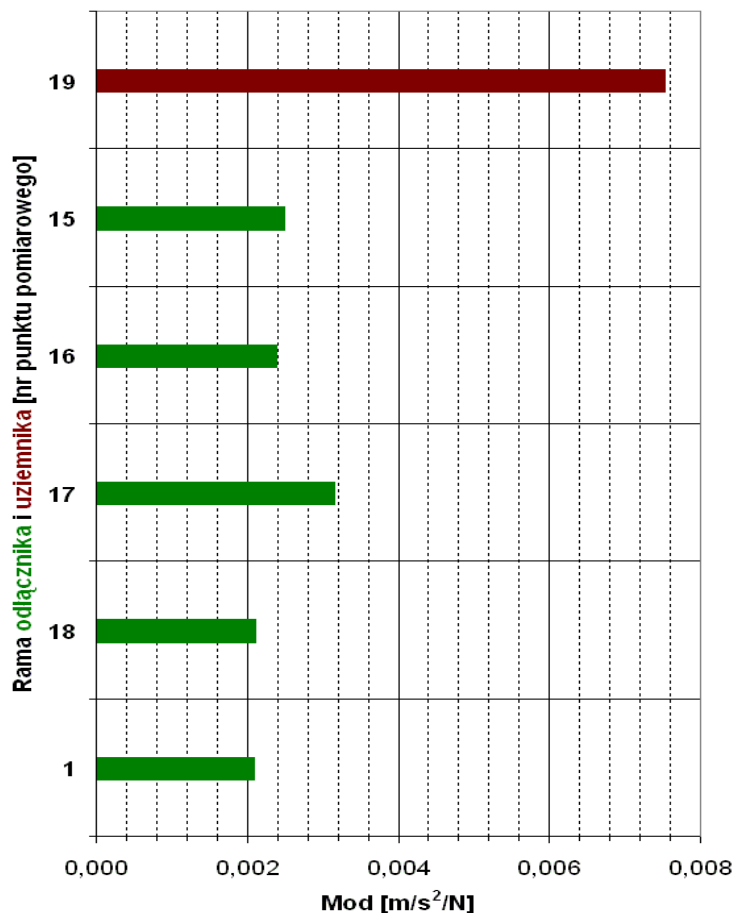
Rys. 3.25. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 12,93$ Hz.

Tabela 3.14 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
6X	0,221588	90,3	0,55%
7X	0,211741		
8X	0,212301		
9X	0,207406		
10X	0,199774		

Tabela 3.14. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika oraz rama uziemnika są w rezonansie. Formę drgań rami i uziemnika dla $f_{R1} = 12,93$ Hz przedstawiono na Rys. 3.26.



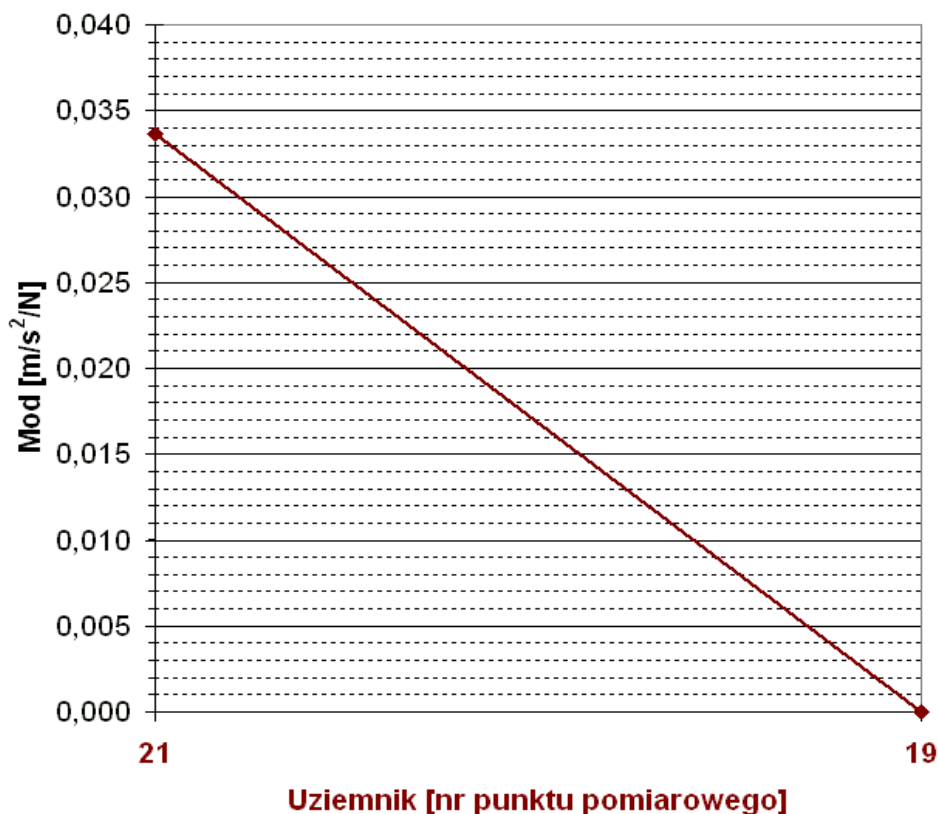
Rys. 3.26. Forma drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R1} = 12,93$ Hz.

Tabela 3.15 prezentuje zestawienie formy drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	mod [m/s²/N]	Współczynnik	
		dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika			
1X	0,002084	95,8	0,52%
18X	0,002113		
17X	0,003150		
16X	0,002382		
15X	0,002499		
Rama uziemnika			
19X	0,007522	84,7	0,59%

Tabela 3.15. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R1} = 12,93$ Hz przedstawiono na Rys. 3.27.



Rys. 3.27. Forma drgań uziemnika dla $f_{R1} = 12,93$ Hz.

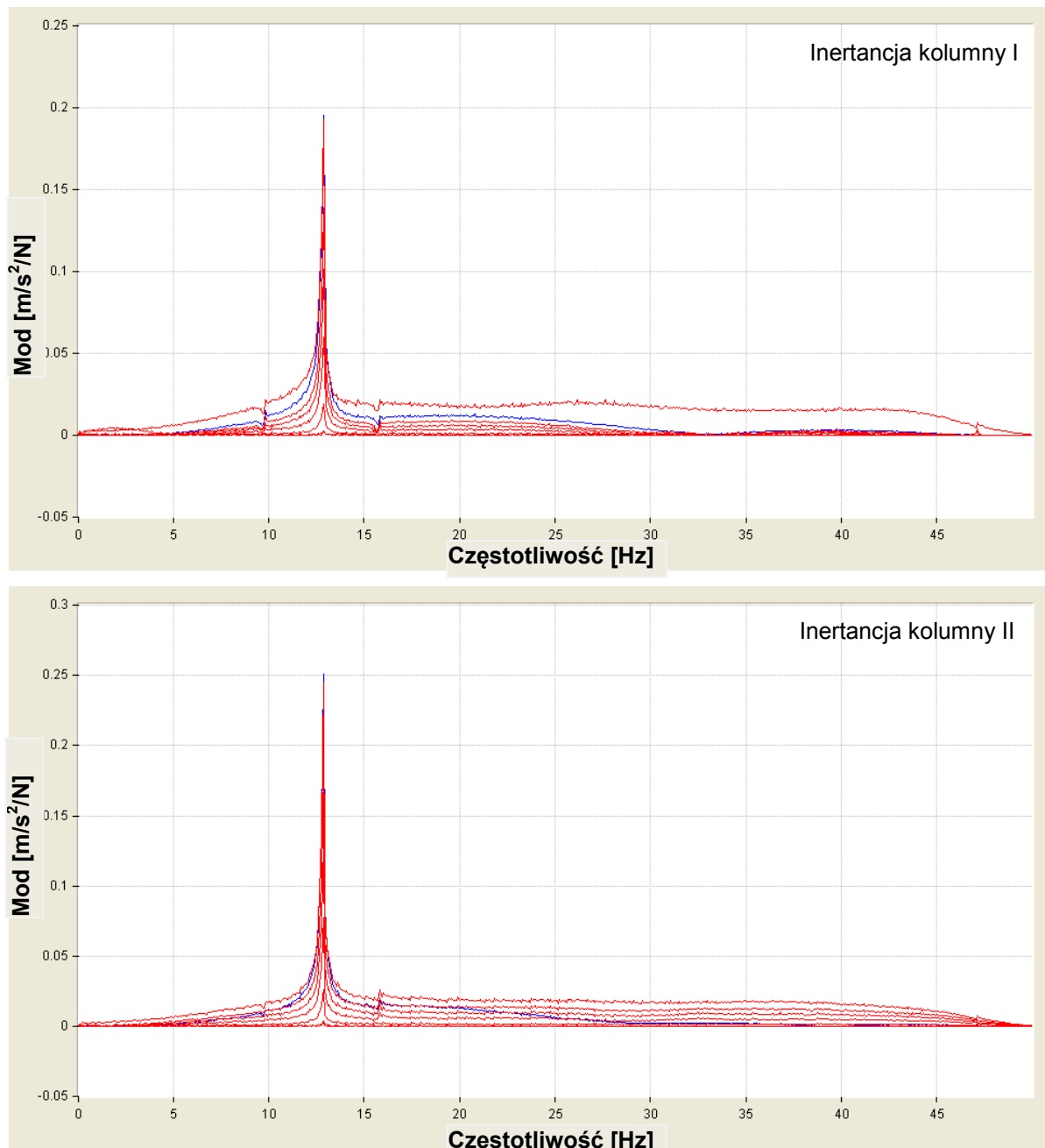
Tabela 3.16 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
21Z	0,033611	81,9	0,61%
19	0,000000		

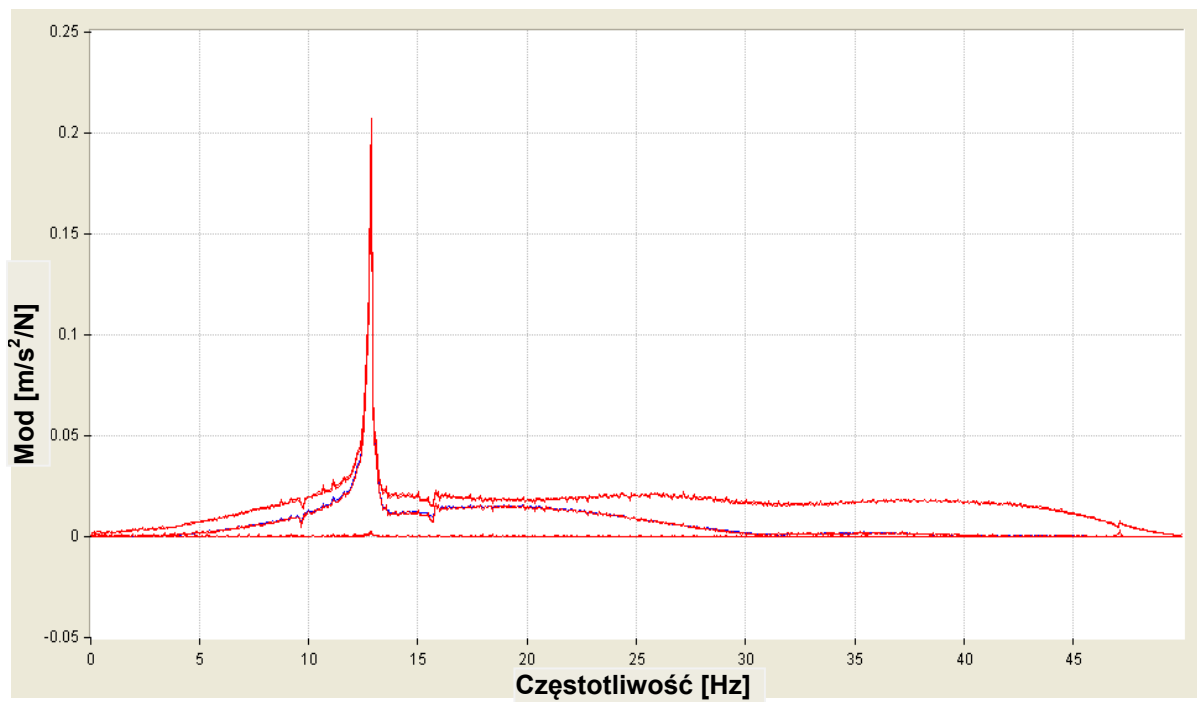
Tabela 3.16. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,93$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.4 Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę II

Na Rys. 3.28 - 3.29 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn oraz toru prądowego.



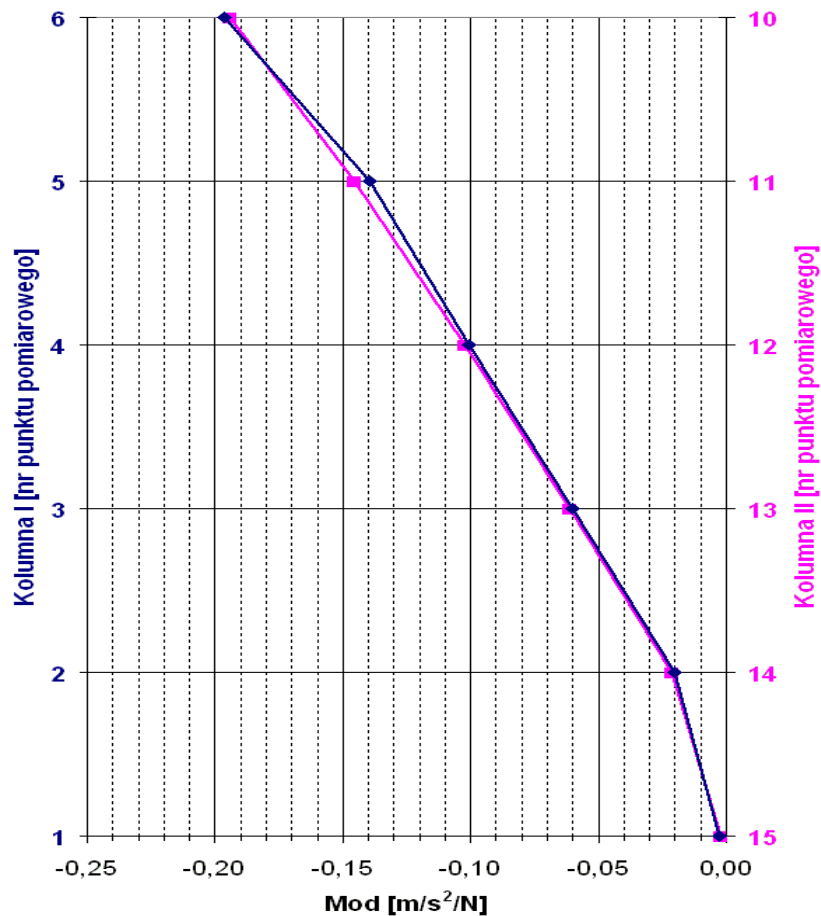
Rys. 3.28. Wykresy inertancji kolumn I i II.



Rys. 3.29. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego.

3.2.3.4.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 12,88$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 12,88$ Hz przedstawiono na Rys. 3.30.



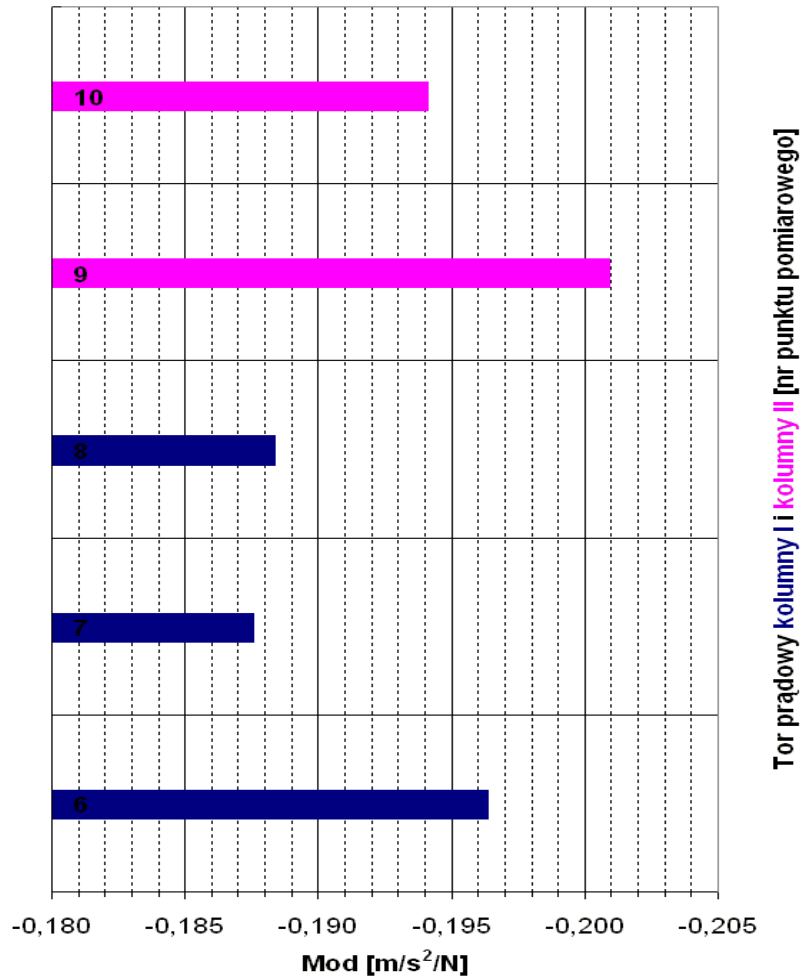
Rys. 3.30. Forma drgań dla $f_{R1} = 12,88$ Hz.

Tabela 3.17 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1X	-0,002597	87,9	0,57%	15X	-0,002423	103,8	0,48%
2X	-0,020002			14X	-0,021244		
3X	-0,060433			13X	-0,061322		
4X	-0,100924			12X	-0,102539		
5X	-0,139619			11X	-0,145479		
6X	-0,196381			10X	-0,194090		

Tabela 3.17. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 12,88$ Hz przedstawiono na Rys. 3.31.



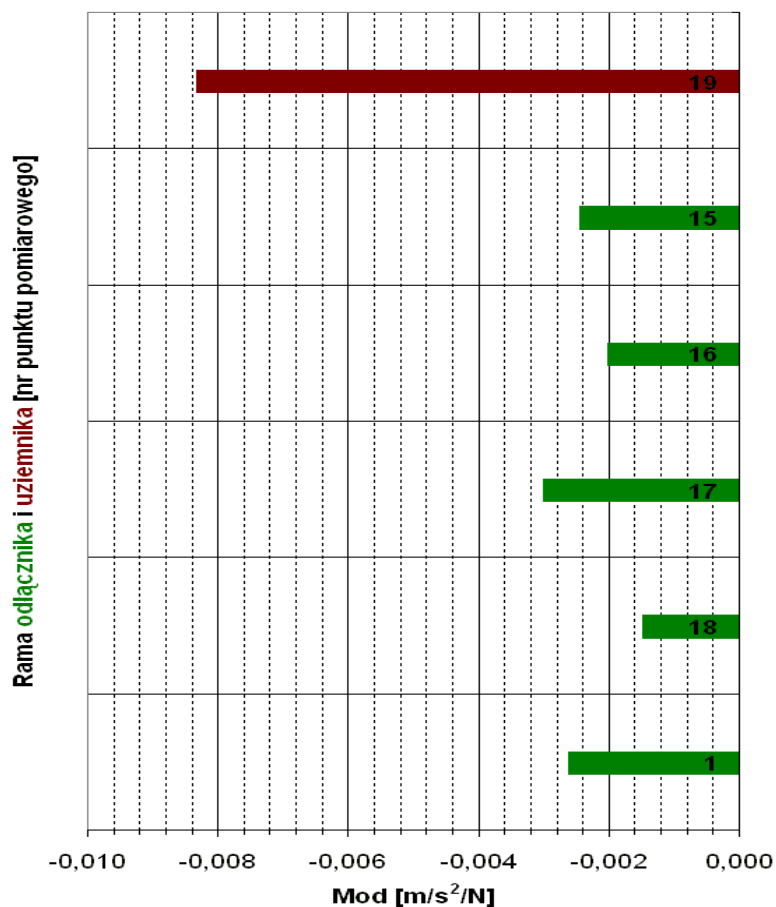
Rys. 3.31. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 12,88$ Hz.

Tabela 3.18 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
6X	-0,196381	87,8	0,57%
7X	-0,187570		
8X	-0,188350		
9X	-0,200944		
10X	-0,194090		

Tabela 3.18. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika oraz rama uziemnika są w rezonansie. Formę drgań rami i uziemnika dla $f_{R1} = 12,88$ Hz przedstawiono na Rys. 3.32.



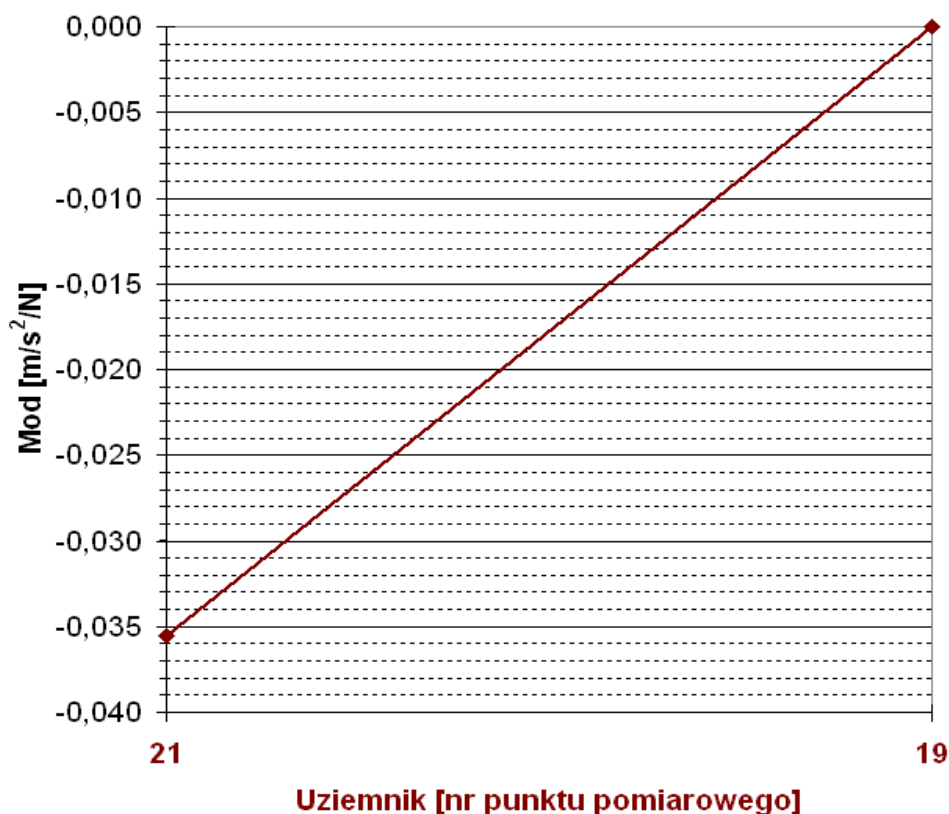
Rys. 3.32. Forma drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R1} = 12,88$ Hz.

Tabela 3.19 prezentuje zestawienie formy drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	mod [m/s²/N]	Współczynnik	
		dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika			
1X	-0,002597	92,5	0,54%
18X	-0,001467		
17X	-0,002973		
16X	-0,001987		
15X	-0,002423		
Rama uziemnika			
19X	-0,008307	75,1	0,67%

Tabela 3.19. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R1} = 12,88$ Hz przedstawiono na Rys. 3.33.



Rys. 3.33. Forma drgań uziemnika dla $f_{R1} = 12,88$ Hz.

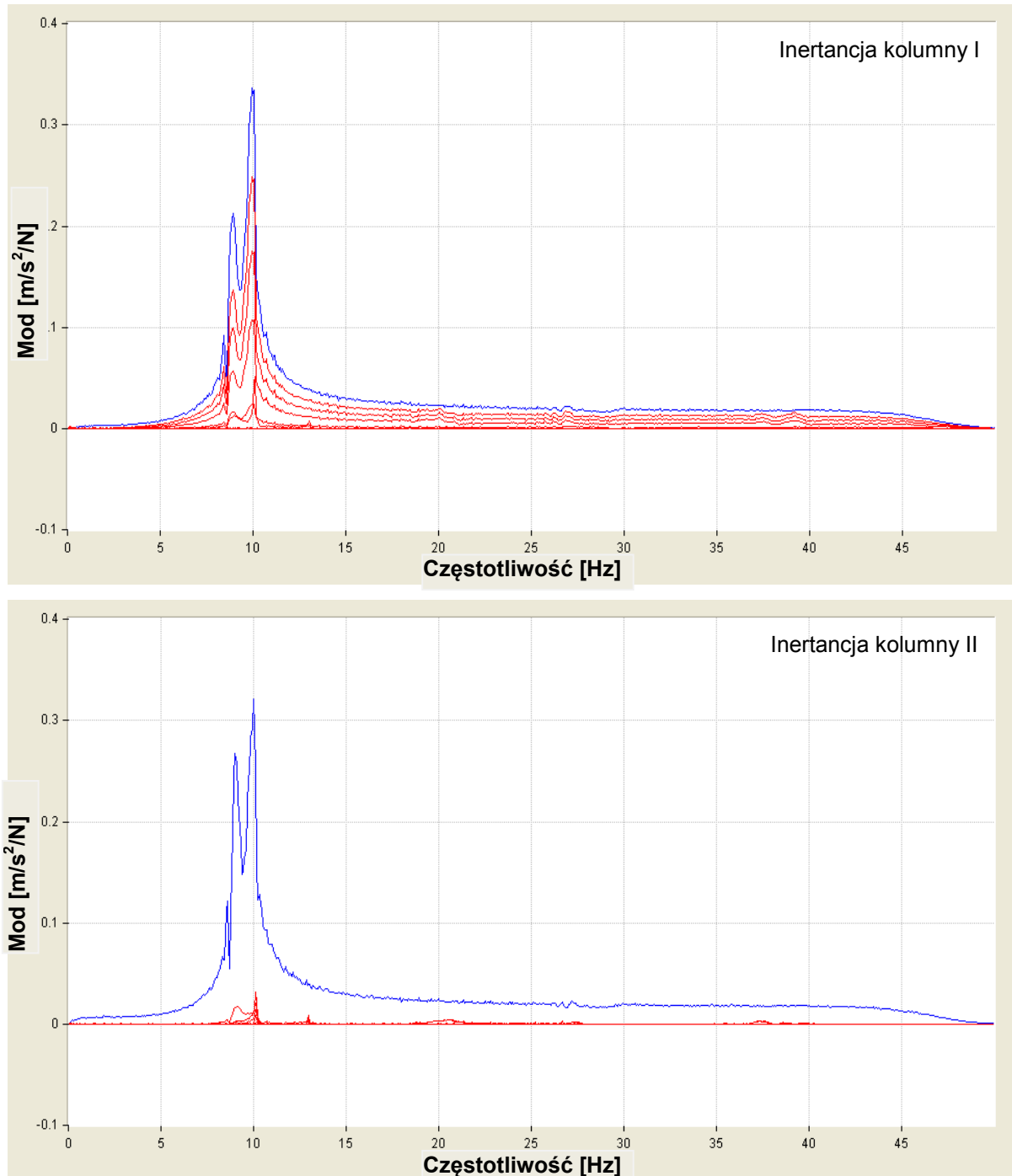
Tabela 3.20 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
21Z	-0,035551	82,1	0,61%
19	0,000000		

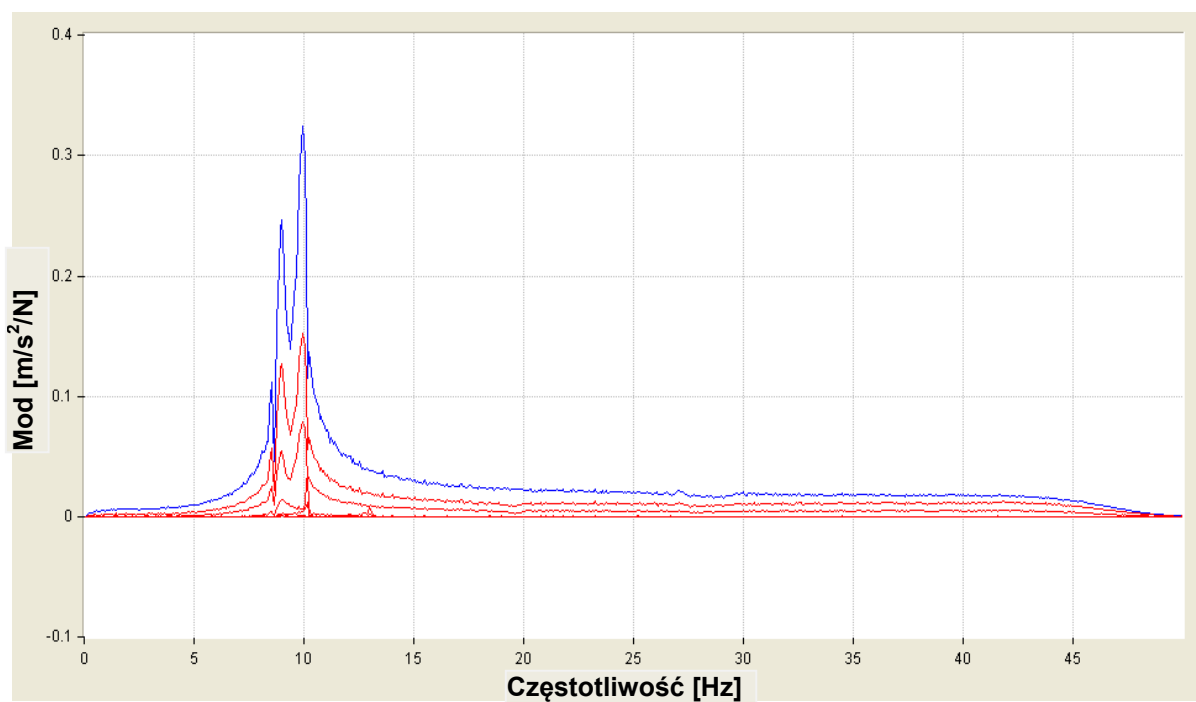
Tabela 3.20. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 12,88$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.5 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I

Na Rys. 3.34 - 3.35 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn oraz toru prądowego.



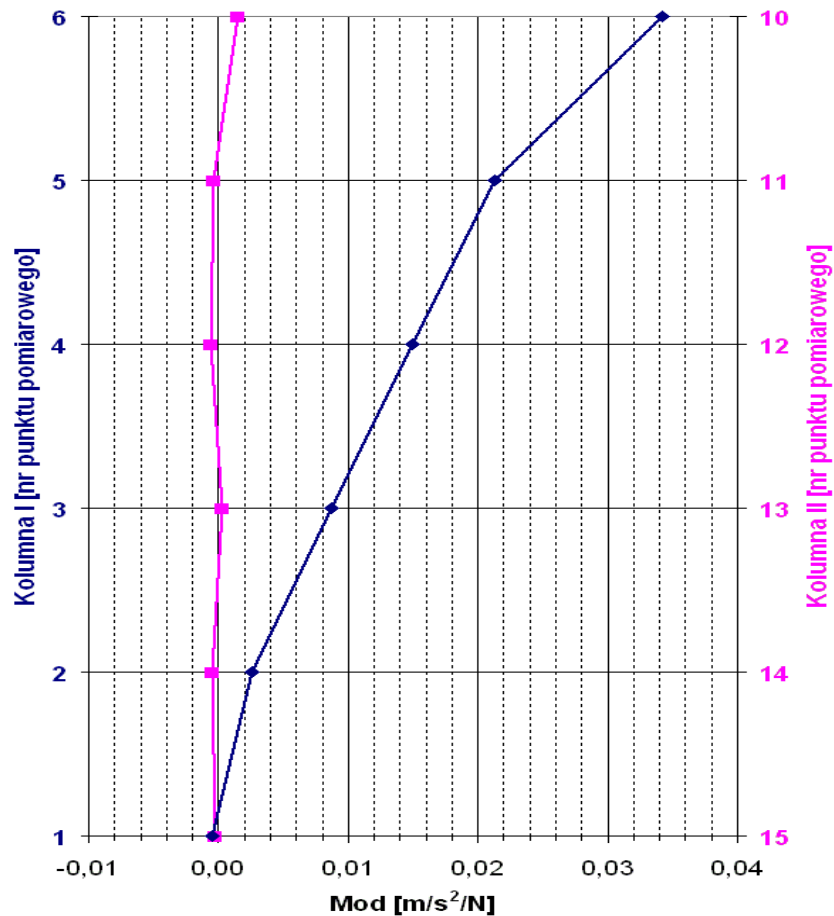
Rys. 3.34. Wykresy inertancji kolumn I i II.



Rys. 3.35. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego i szczytów kolumn.

3.2.3.5.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 8,45 \text{ Hz}$

Kolumna I jest w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 8,45 \text{ Hz}$ przedstawiono na Rys. 3.36.



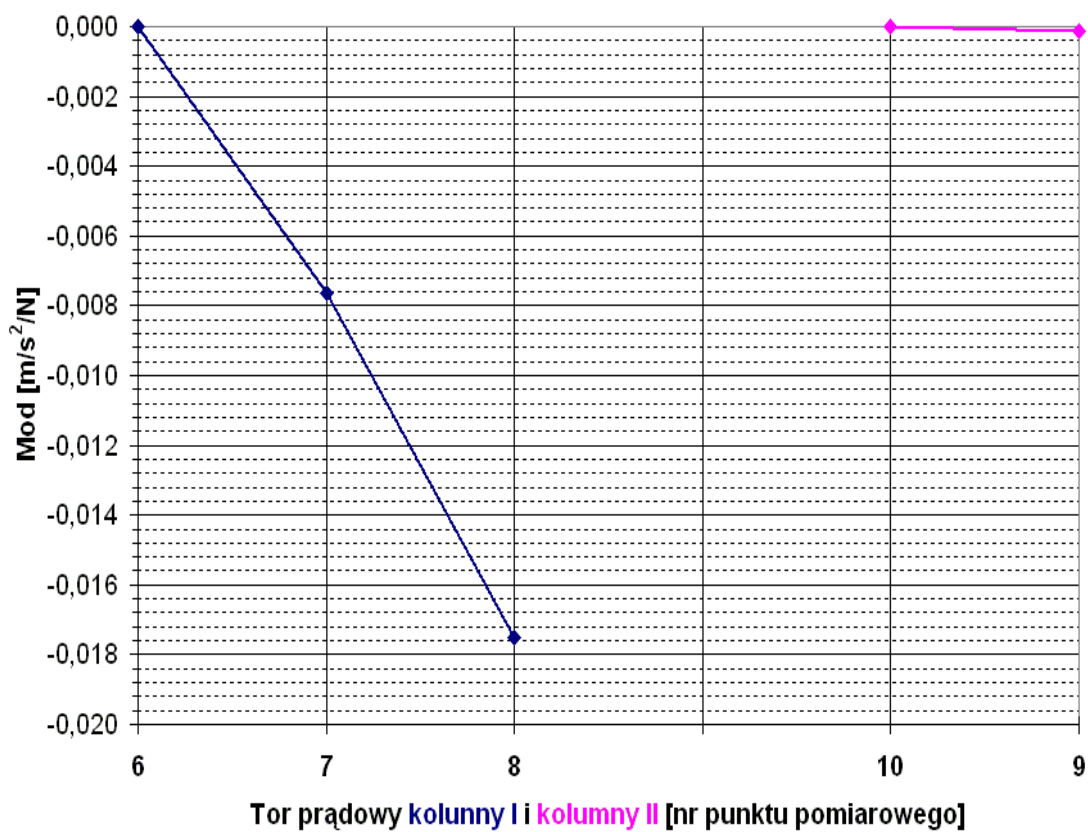
Rys. 3.36. Forma drgań dla $f_{R1} = 8,45 \text{ Hz}$.

Tabela 3.21 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 8,45 \text{ Hz}$ wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	-0,000473	39,3	1,27%	15Y	-0,000277	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
2Y	0,002541			14Y	-0,000466		
3Y	0,008705			13Y	0,000335		
4Y	0,014948			12Y	-0,000598		
5Y	0,021286			11Y	-0,000370		
6Y	0,034158			10Y	0,001479		

Tabela 3.21. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 8,45 \text{ Hz}$ wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tor prądowy kolumny I jest w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 8,45$ Hz przedstawiono na Rys. 3.37.



Rys. 3.37. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 8,45$ Hz.

Tabela 3.22 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 8,45$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Kolumna	Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
I	6Z	0,000000	58,8	0,85%
	7Z	-0,007629		
	8Z	-0,017509		
II	10Z	0,000000	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
	9Z	-0,000142		

Tabela 3.22. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 8,45$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika oraz rama uziemnika nie są w rezonansie. Formę drgań ramy i uziemnika dla $f_{R1} = 8,45$ Hz przedstawiono na Rys. 3.38.



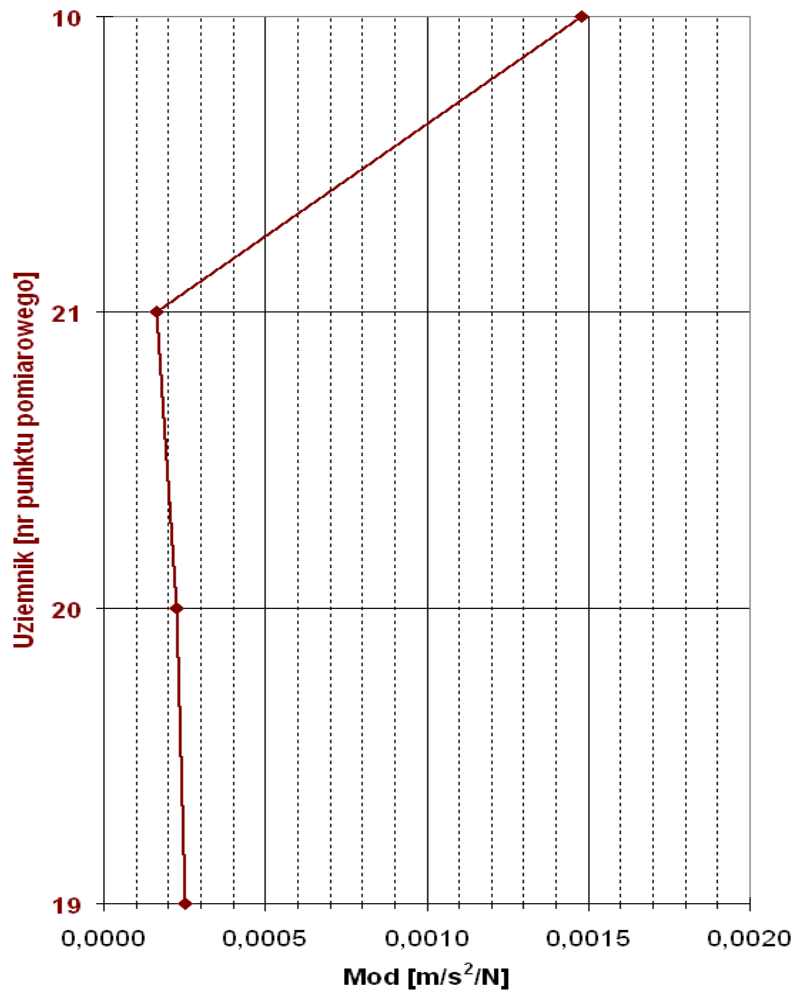
Rys. 3.38. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 8,45$ Hz.

Tabela 3.23 prezentuje zestawienie formy drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 8,45$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	mod [$m/s^2/N$]	Współczynnik	
		dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika			
1Y	-0,000473	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
18Y	0,002282		
17Y	0,000917		
16Y	0,000910		
15Y	-0,000277		
Rama uziemnika			
19Y	0,000252	BDdA	BDdA

Tabela 3.23. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 8,45$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik nie jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R1} = 8,45$ Hz przedstawiono na Rys. 3.39.



Rys. 3.39. Forma drgań uziemnika dla $f_{R1} = 8,45$ Hz.

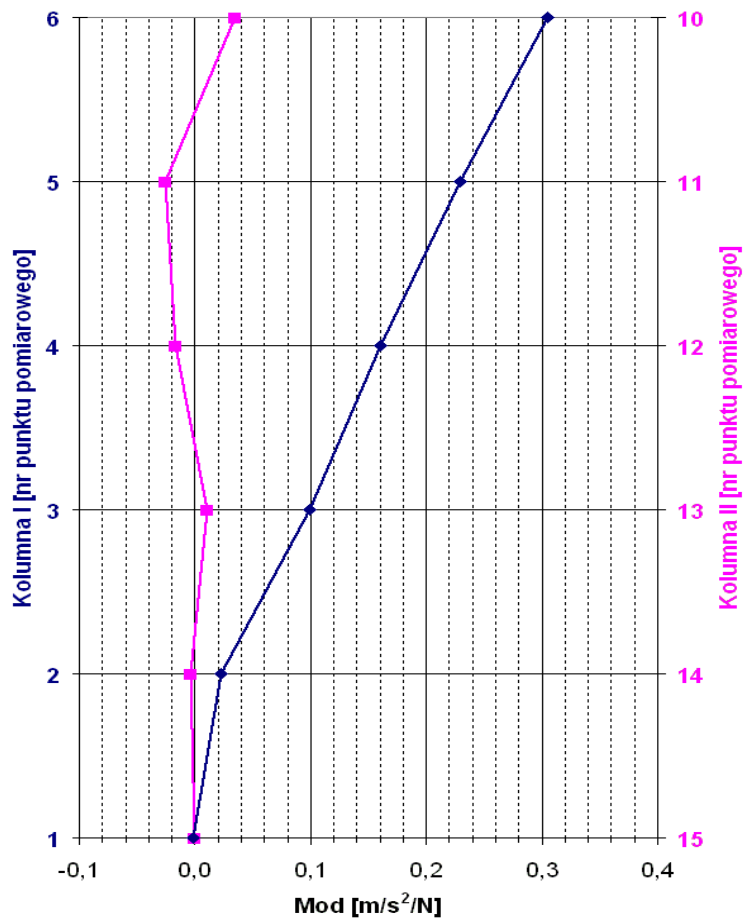
Tabela 3.24 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R1} = 8,45$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [$m/s^2/N$]	dobroci Q	tłumienia ξ
19Y	0,000252	Brak danych	Brak danych
20Y	0,000226	do analizy	do analizy
21Y	0,000164		
10Y	0,001479		

Tabela 3.24. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 8,45$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.5.2 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 10,08$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R2} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.40.



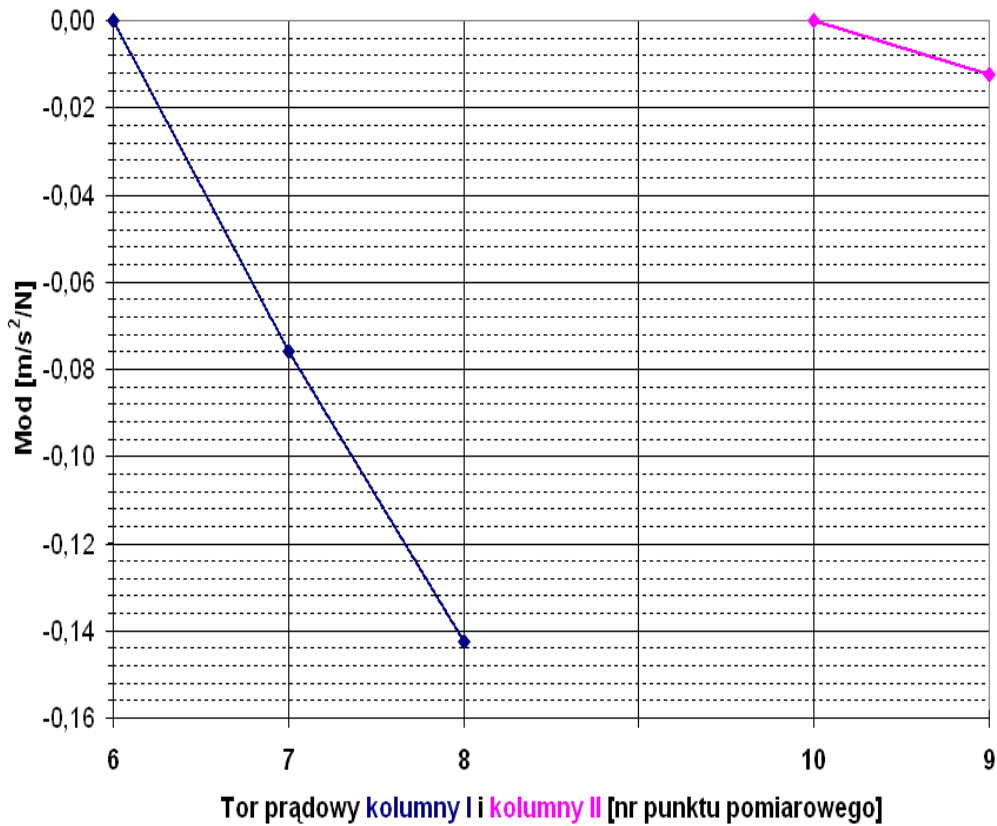
Rys. 3.40. Forma drgań dla $f_{R2} = 10,08$ Hz.

Tabela 3.25 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	-0,001127	23,6	2,12%	15Y	-0,000619	80,0	0,63%
2Y	0,022377			14Y	-0,003389		
3Y	0,099113			13Y	0,010909		
4Y	0,160159			12Y	-0,017096		
5Y	0,229016			11Y	-0,025629		
6Y	0,305063			10Y	0,034494		

Tabela 3.25. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R2} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.41.



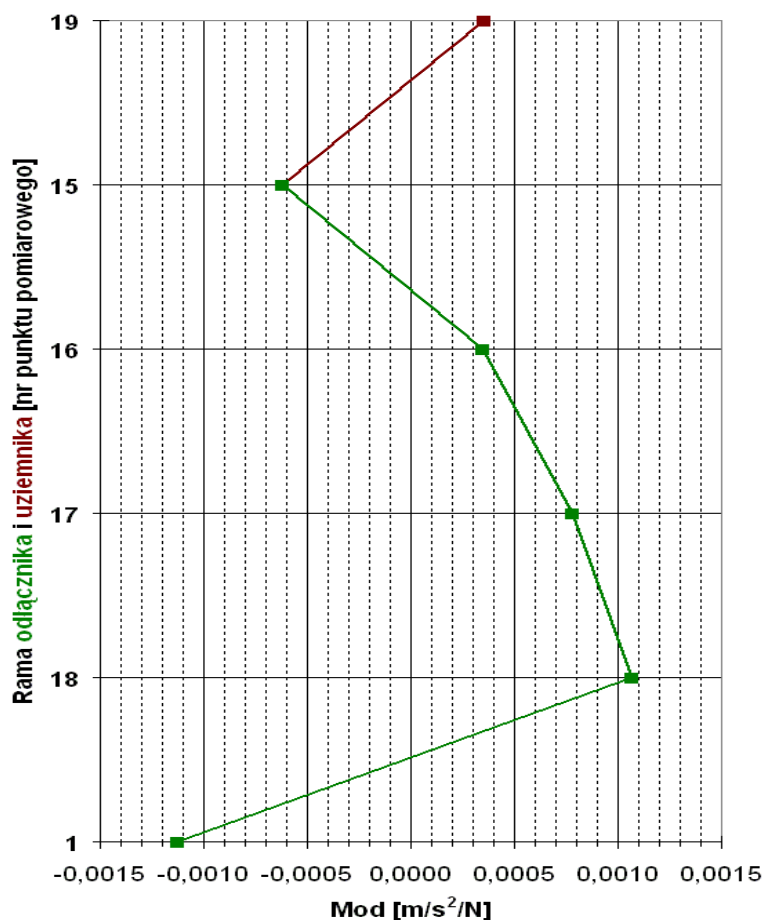
Rys. 3.41. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 10,08$ Hz.

Tabela 3.26 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Kolumna pomiarowa i składowa	Punkt pomiarowy	Tory prądowe	Współczynnik	
		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
I	6Z	0,000000	24,1	2,08%
	7Z	-0,075934		
	8Z	-0,142581		
II	10Z	0,000000	86,8	0,58%
	9Z	-0,012336		

Tabela 3.26. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika oraz rama uziemnika nie są w rezonansie. Formę drgań ramy i uziemnika dla $f_{R2} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.42.



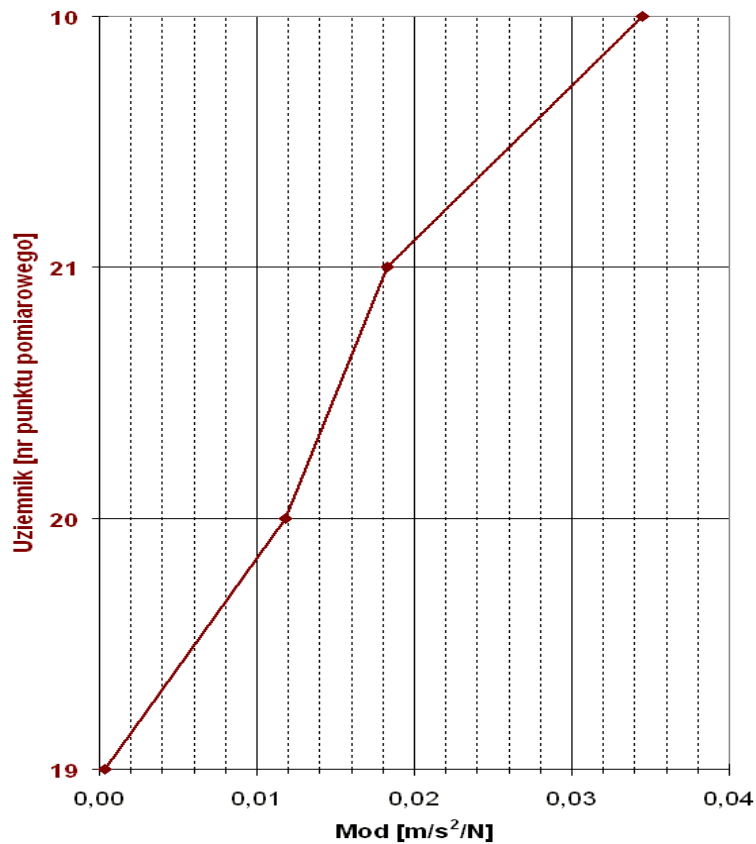
Rys. 3.42. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R2} = 10,08$ Hz.

Tabela 3.27 prezentuje zestawienie formy drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	mod [m/s ² /N]	Współczynnik	
		dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika			
1Y	-0,001127	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
18Y	0,001064		
17Y	0,000777		
16Y	0,000350		
15Y	-0,000619		
Rama uziemnika			
19Y	0,000352	BDdA	BDdA

Tabela 3.27. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R2} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.43.



Rys. 3.43. Forma drgań uziemnika dla $f_{R2} = 10,08$ Hz.

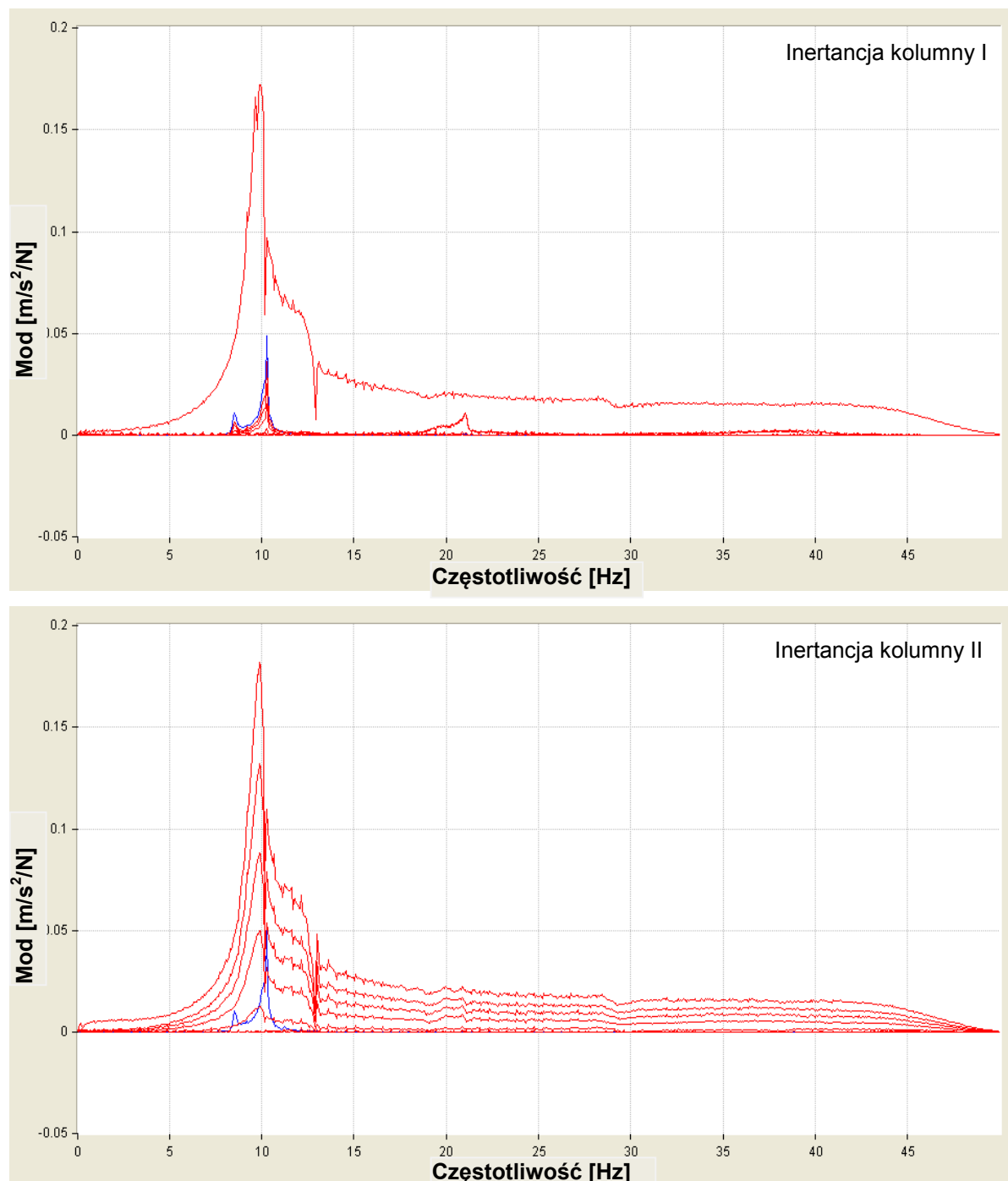
Tabela 3.28 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
19Y	0,000352	93,7	0,53%
20Y	0,011798		
21Y	0,018300		
10Y	0,034494		

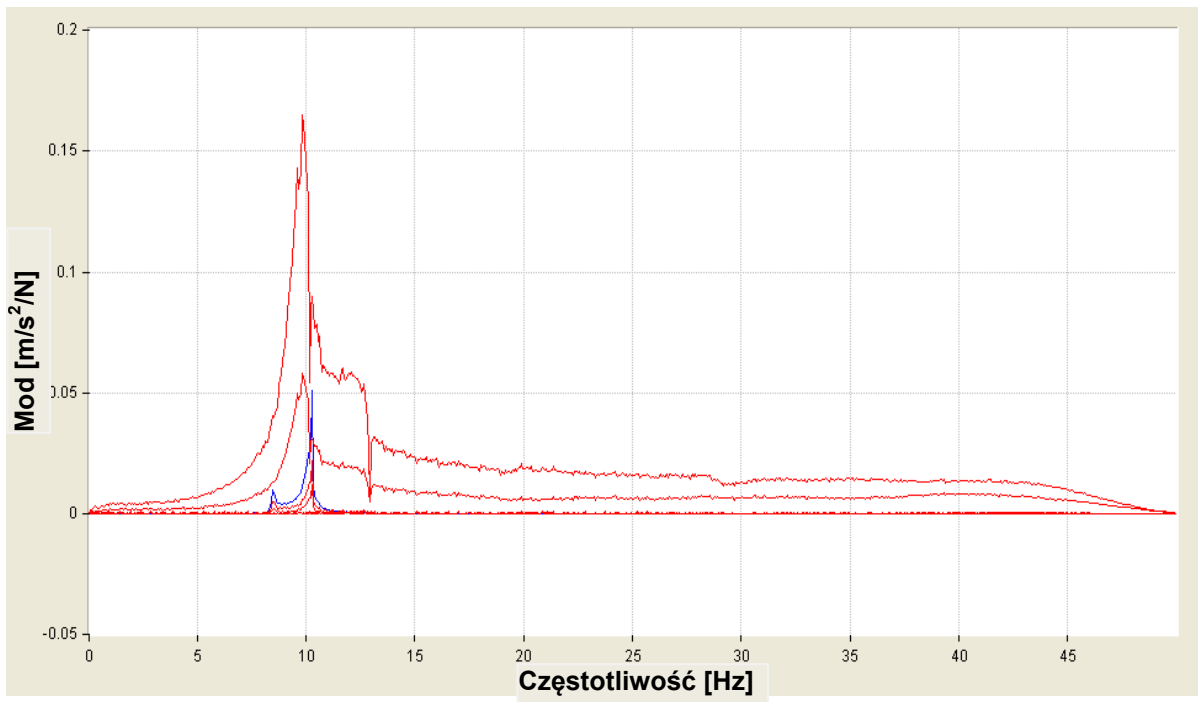
Tabela 3.28. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.6 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę II

Na Rys. 3.44 - 3.45 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn oraz toru prądowego.



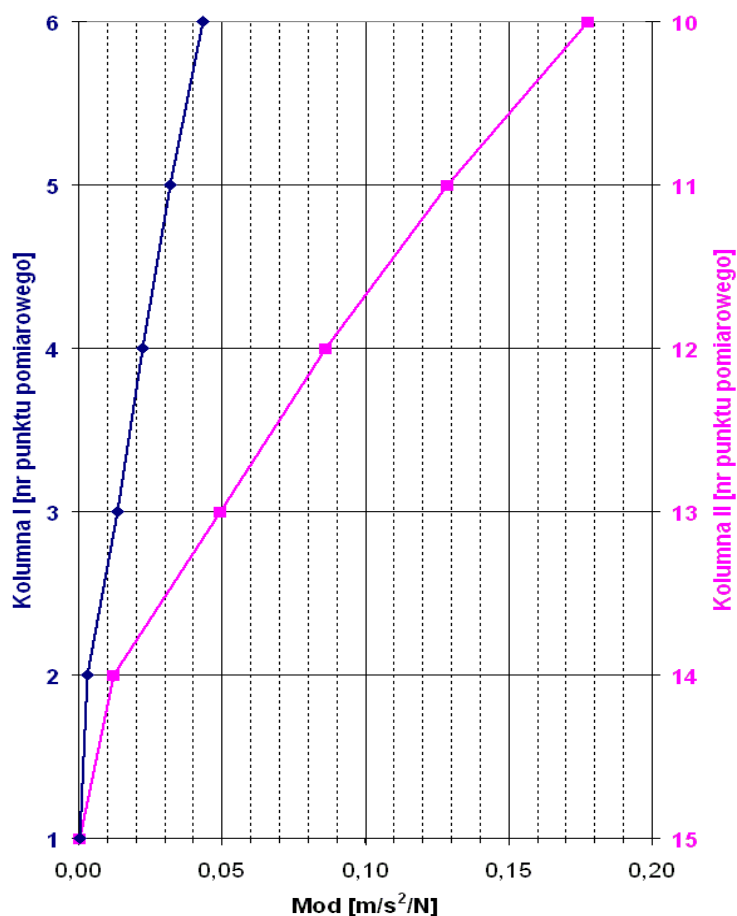
Rys. 3.44. Wykresy inertancji kolumn I i II.



Rys. 3.45. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego i szczytów kolumn.

3.2.3.6.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 10,08$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.46.



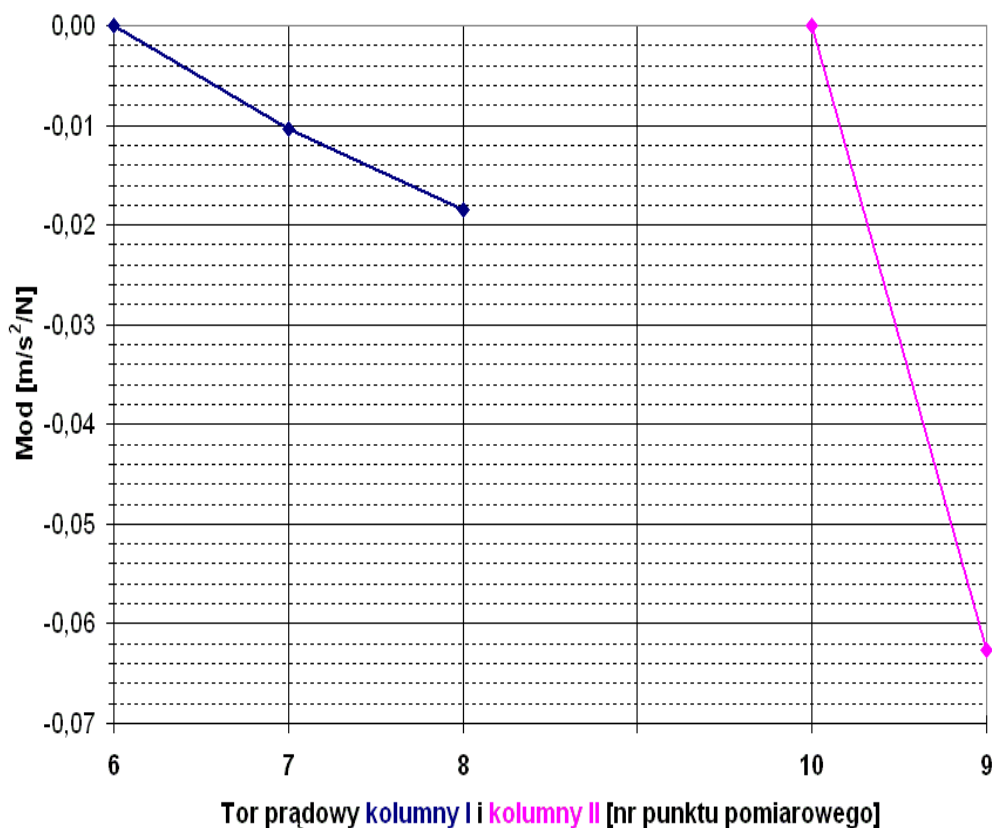
Rys. 3.46. Forma drgań dla $f_{R1} = 10,08$ Hz.

Tabela 3.29 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Y	0,000488	112,7	0,44%	15Y	0,000561	14,1	3,55%
2Y	0,003206			14Y	0,012441		
3Y	0,013659			13Y	0,049304		
4Y	0,022190			12Y	0,086248		
5Y	0,032041			11Y	0,128617		
6Y	0,043259			10Y	0,177574		

Tabela 3.29. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.47.



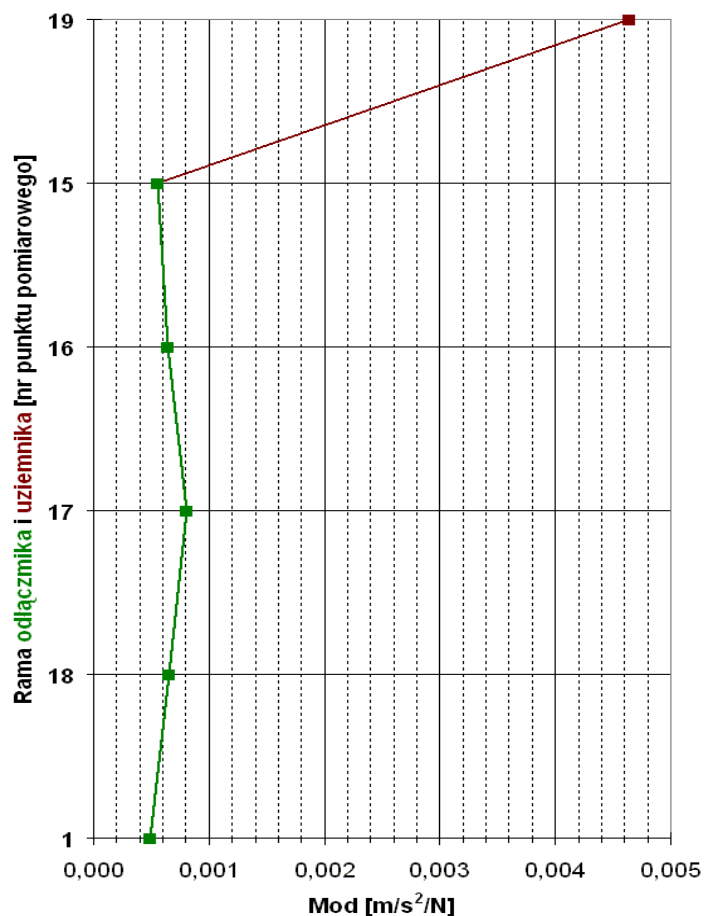
Rys. 3.47. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 10,08$ Hz.

Tabela 3.30 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Kolumna	Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
I	6Z	0,000000	143,6	0,35%
	7Z	-0,010317		
	8Z	-0,018505		
II	10Z	0,000000	15,0	3,33%
	9Z	-0,062588		

Tabela 3.30. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika oraz rama uziemnika nie są w rezonansie. Formę drgań ramy i uziemnika dla $f_{R1} = 10,08$ Hz. przedstawiono na Rys. 3.48.



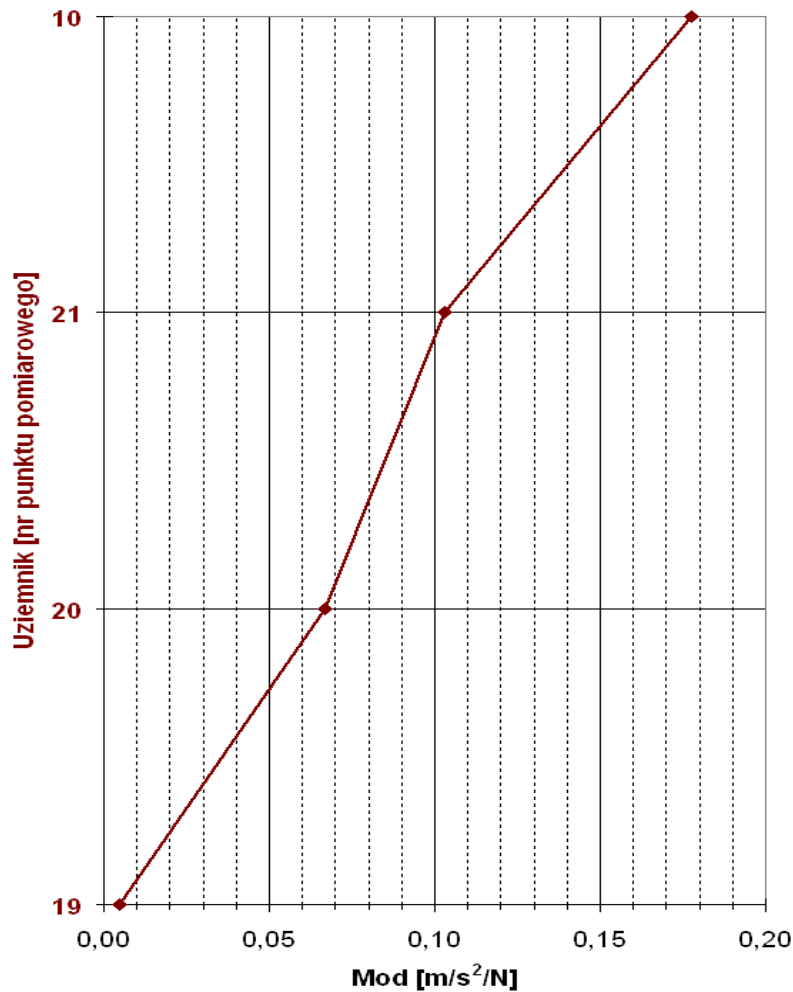
Rys. 3.48. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 10,08$ Hz.

Tabela 3.31 prezentuje zestawienie formy drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	mod [m/s ² /N]	Współczynnik	
		dobroci Q	tłumienia ξ
Rama odłącznika			
1Y	0,000488	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
18Y	0,000653		
17Y	0,000808		
16Y	0,000643		
15Y	0,000561		
Rama uziemnika			
19Y	0,004640	14,6	3,41%

Tabela 3.31. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R1} = 10,08$ Hz przedstawiono na Rys. 3.49.



Rys. 3.49. Forma drgań uziemnika dla $f_{R1} = 10,08$ Hz.

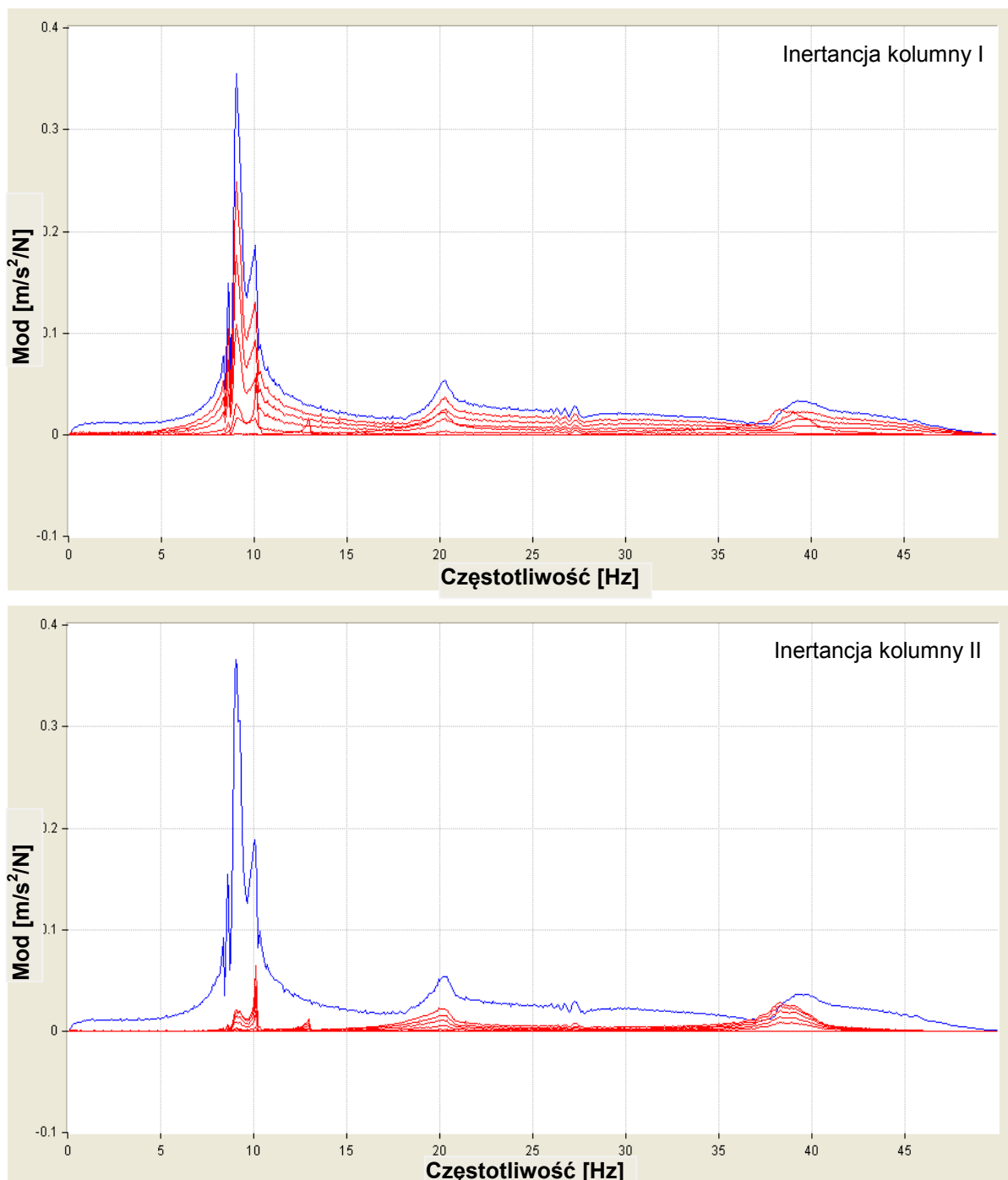
Tabela 3.32 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
19Y	0,004640	13,8	3,63%
20Y	0,066682		
21Y	0,102997		
10Y	0,177574		

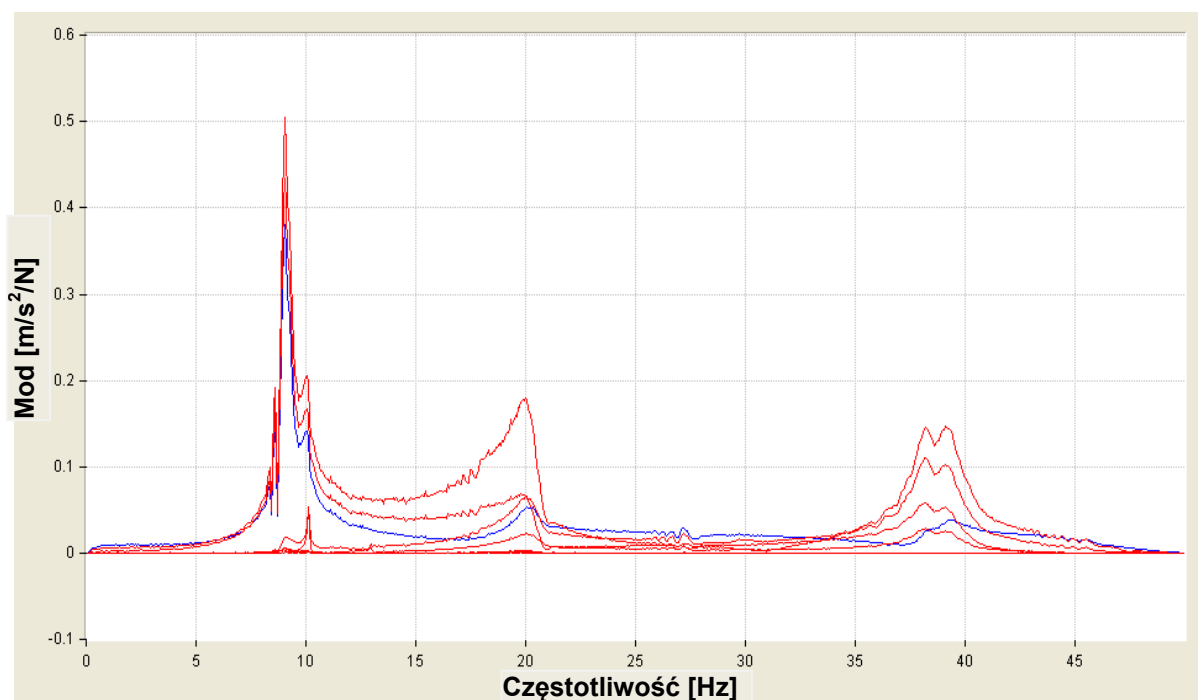
Tabela 3.32. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,08$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.7 Kierunek pobudzenia drgań wzdłużny X, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I

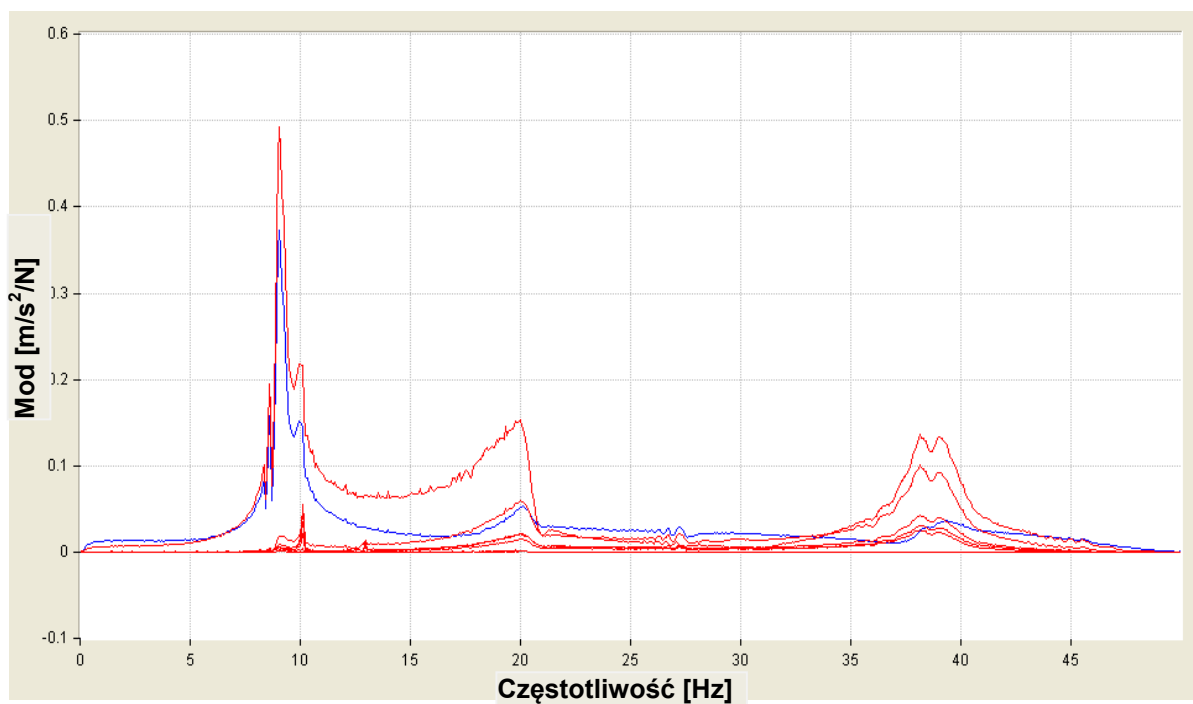
Na Rys. 3.50 - 3.52 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn, toru prądowego i uziemnika.



Rys. 3.50. Wykresy inertancji kolumn I i II.



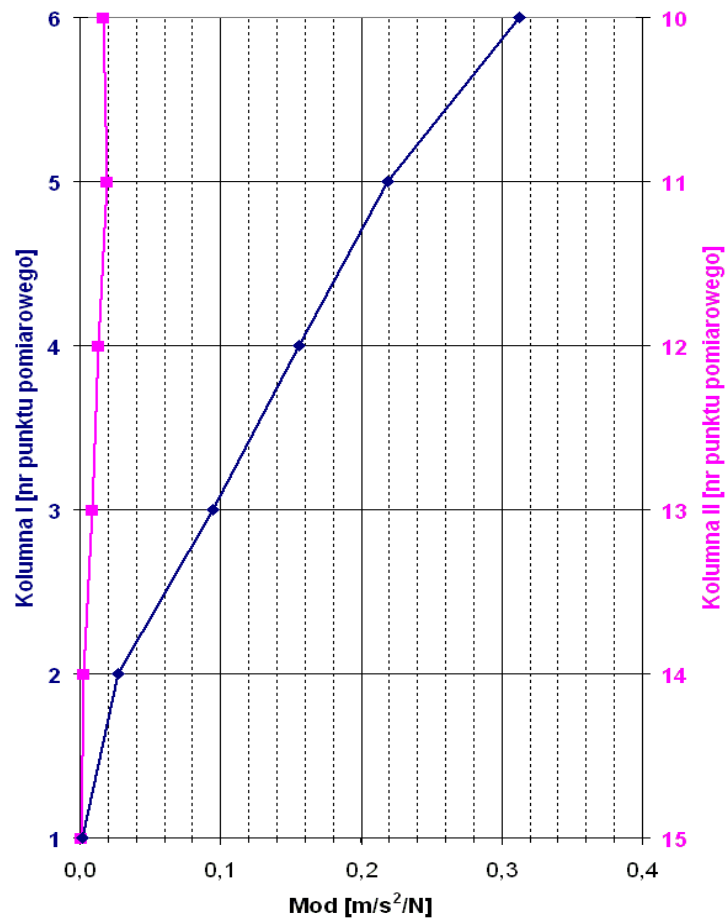
Rys. 3.51. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego i szczytów kolumn.



Rys. 3.52. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych szczytów kolumn i uziemnika.

3.2.3.7.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 9,11$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 9,11$ Hz przedstawiono na Rys. 3.53.



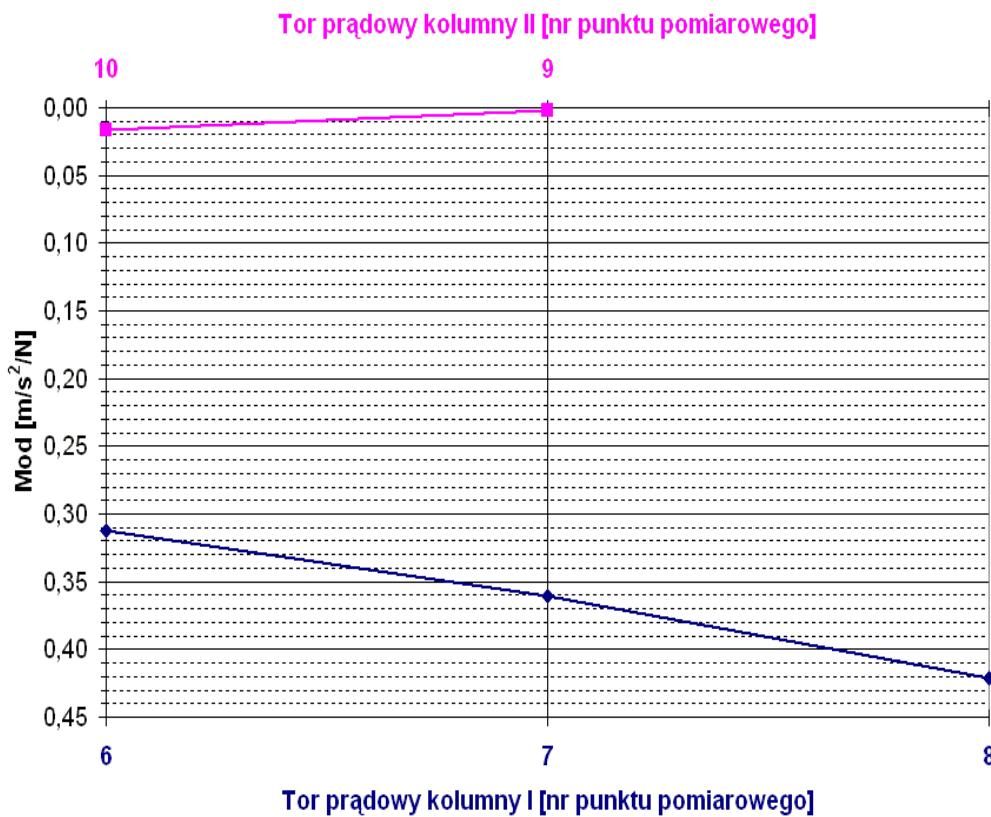
Rys. 3.53. Forma drgań dla $f_{R1} = 9,11$ Hz

Tabela 3.33 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1X	0,001923	25,2	1,98%	15X	0,000875	18,9	2,65%
2X	0,027556			14X	0,002945		
3X	0,094872			13X	0,008317		
4X	0,155580			12X	0,013565		
5X	0,218418			11X	0,018839		
6X	0,312631			10X	0,016911		

Tabela 3.33. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 9,11$ Hz przedstawiono na Rys. 3.54.



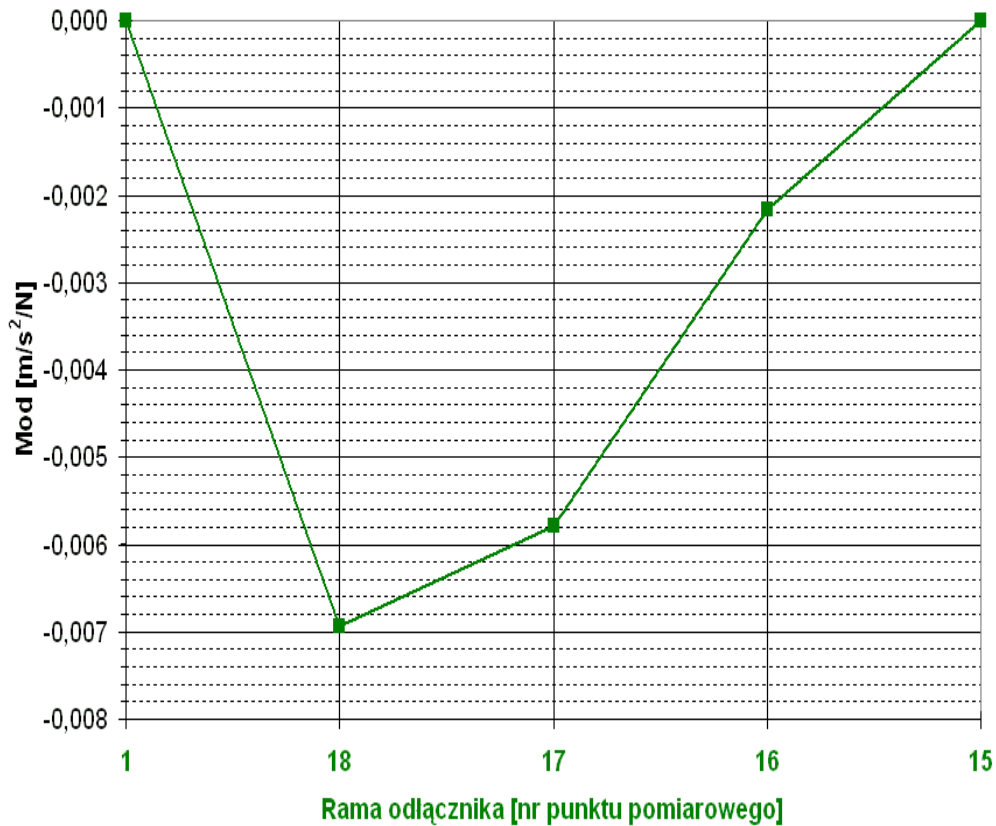
Rys. 3.54. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,11$ Hz.

Tabela 3.34 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Kolumna	Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
I	6X	0,312631	23,6	2,12%
	7X	0,360895		
	8X	0,420967		
II	10X	0,016911	19,8	2,52%
	9X	0,002568		

Tabela 3.34. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika jest w rezonansie. Formę drgań ramy dla $f_{R1} = 9,11$ Hz przedstawiono na Rys. 3.55.



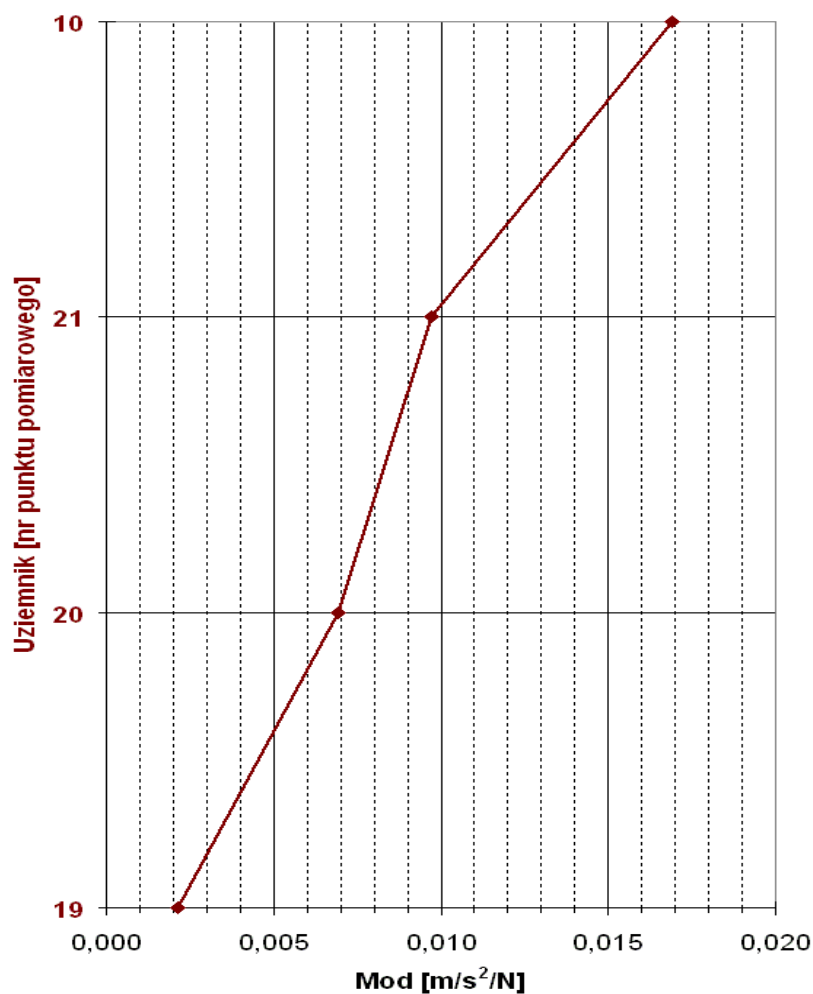
Rys. 3.55. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R1} = 9,11$ Hz.

Tabela 3.35 prezentuje zestawienie formy drgań ramy dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Rama odłącznika	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Z	0,000000	27,7	1,81%
18Z	-0,006941		
17Z	-0,005785		
16Z	-0,002165		
15Z	0,000000		

Tabela 3.35. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R1} = 9,11$ Hz przedstawiono na Rys. 3.56.



Rys. 3.56. Forma drgań uziemnika dla $f_{R1} = 9,11$ Hz

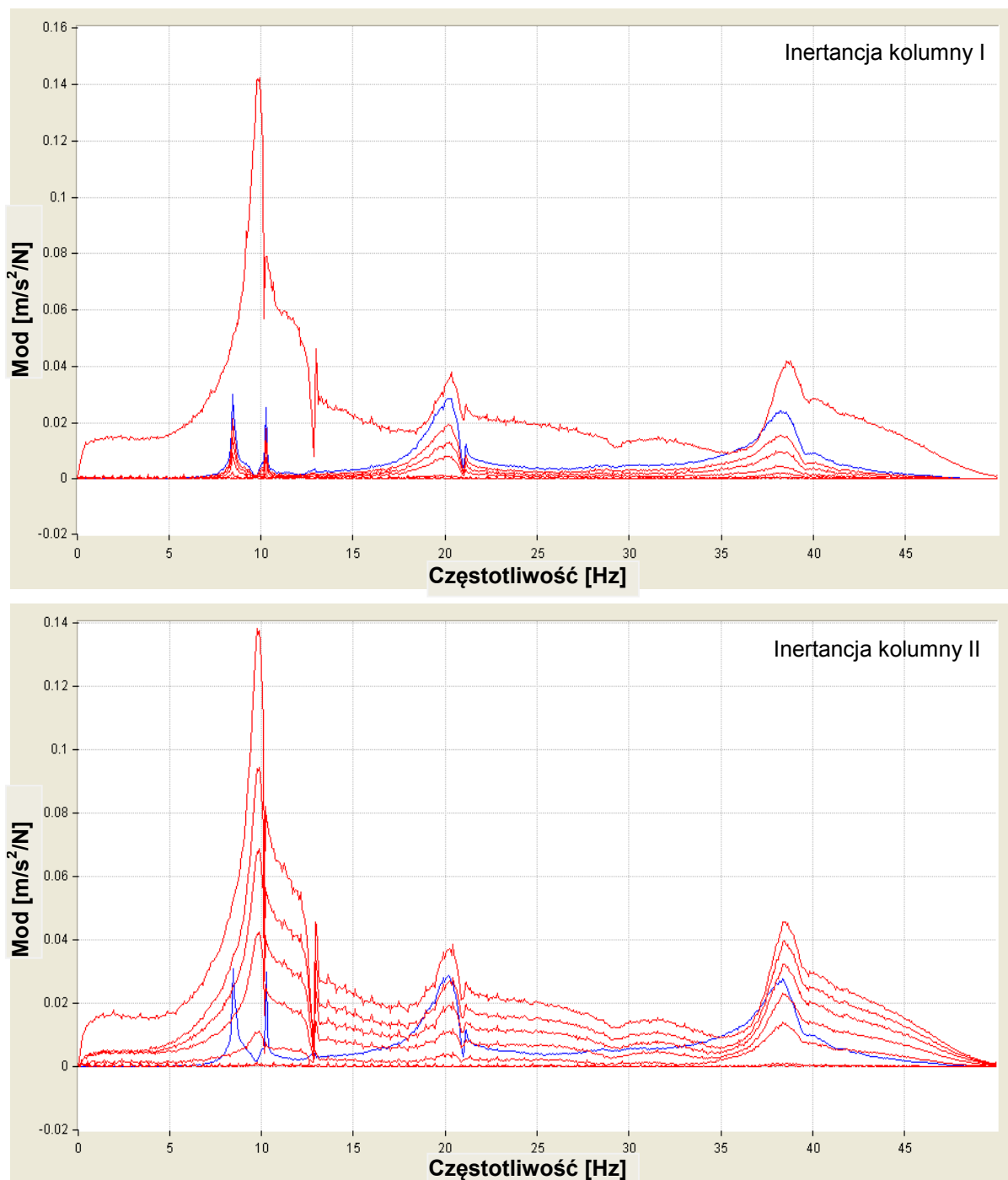
Tabela 3.36 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
19X	0,002154	20,3	2,46%
20X	0,006922		
21X	0,009698		
10X	0,016911		

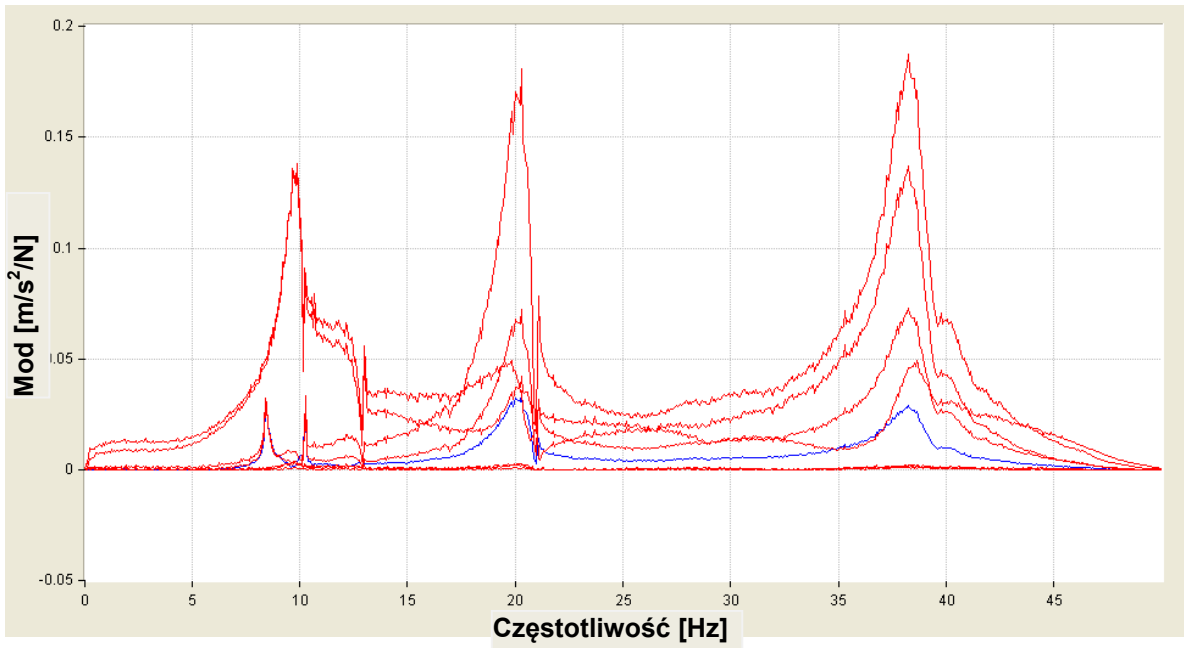
Tabela 3.36. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 9,11$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.7.2 Kierunek pobudzenia drgań wzdluzny X, odlacznik otwarty, uderzenie w kolumnę II

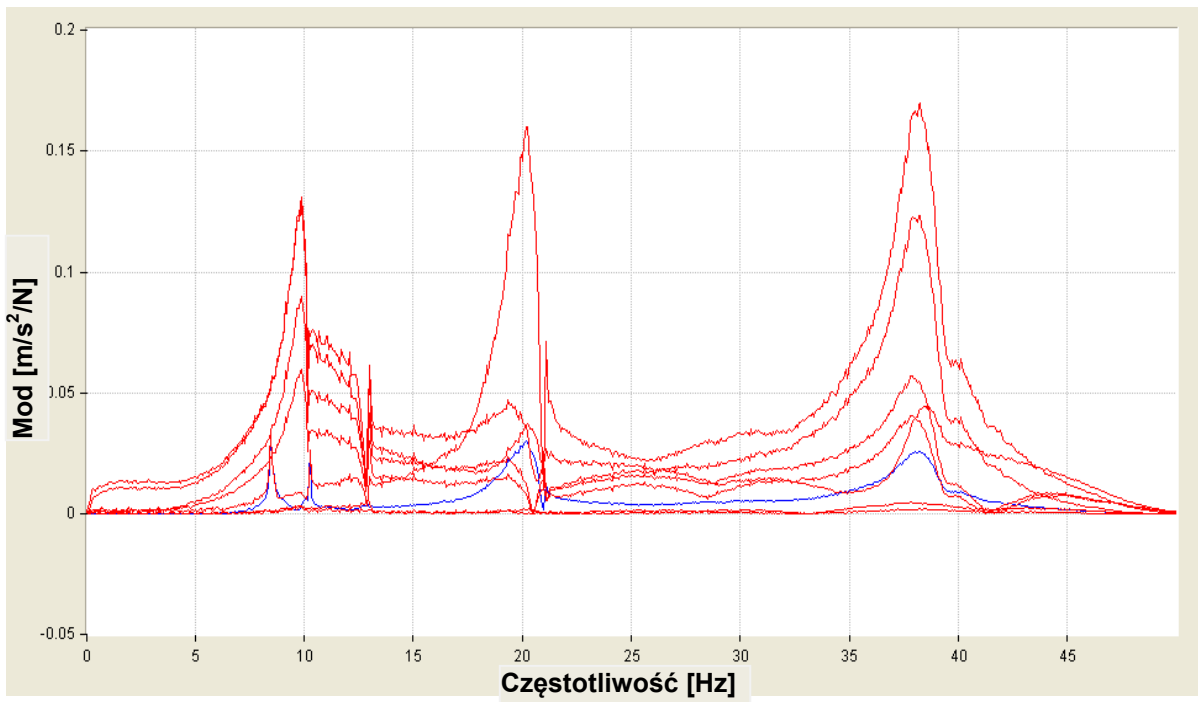
Na Rys. 3.57 - 3.59 przedstawiono wykresy inertancji dla punktów pomiarowych kolumn, toru prądowego oraz ramy i uziemnika.



Rys. 3.57. Wykresy inertancji kolumn I i II.



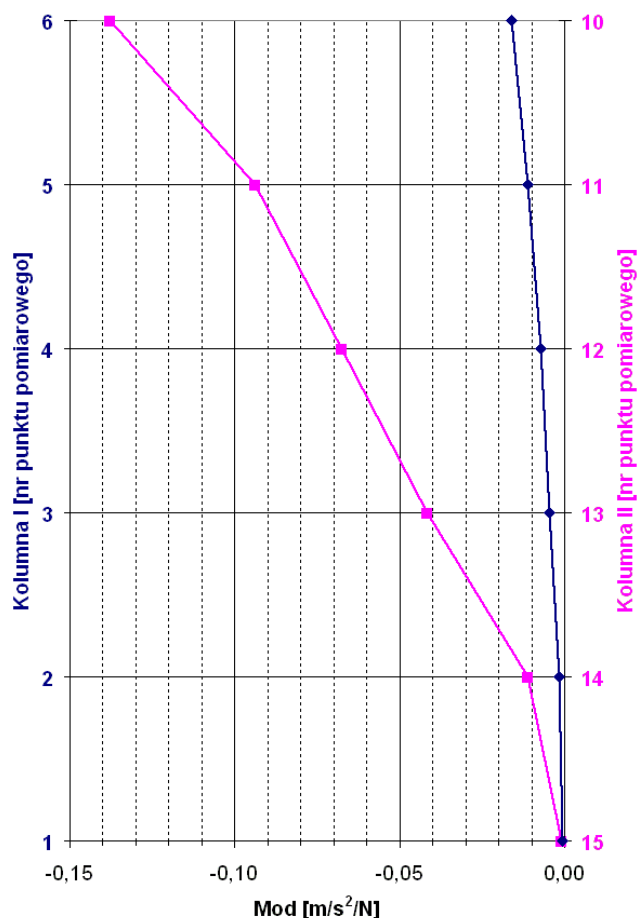
Rys. 3.58. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych toru prądowego, i szczytów kolumn i ramy.



Rys. 3.59. Wykres inercyjności dla punktów pomiarowych szczytów kolumn i uziemnika.

3.2.3.7.3 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 10,03$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 10,03$ Hz przedstawiono na Rys. 3.60.



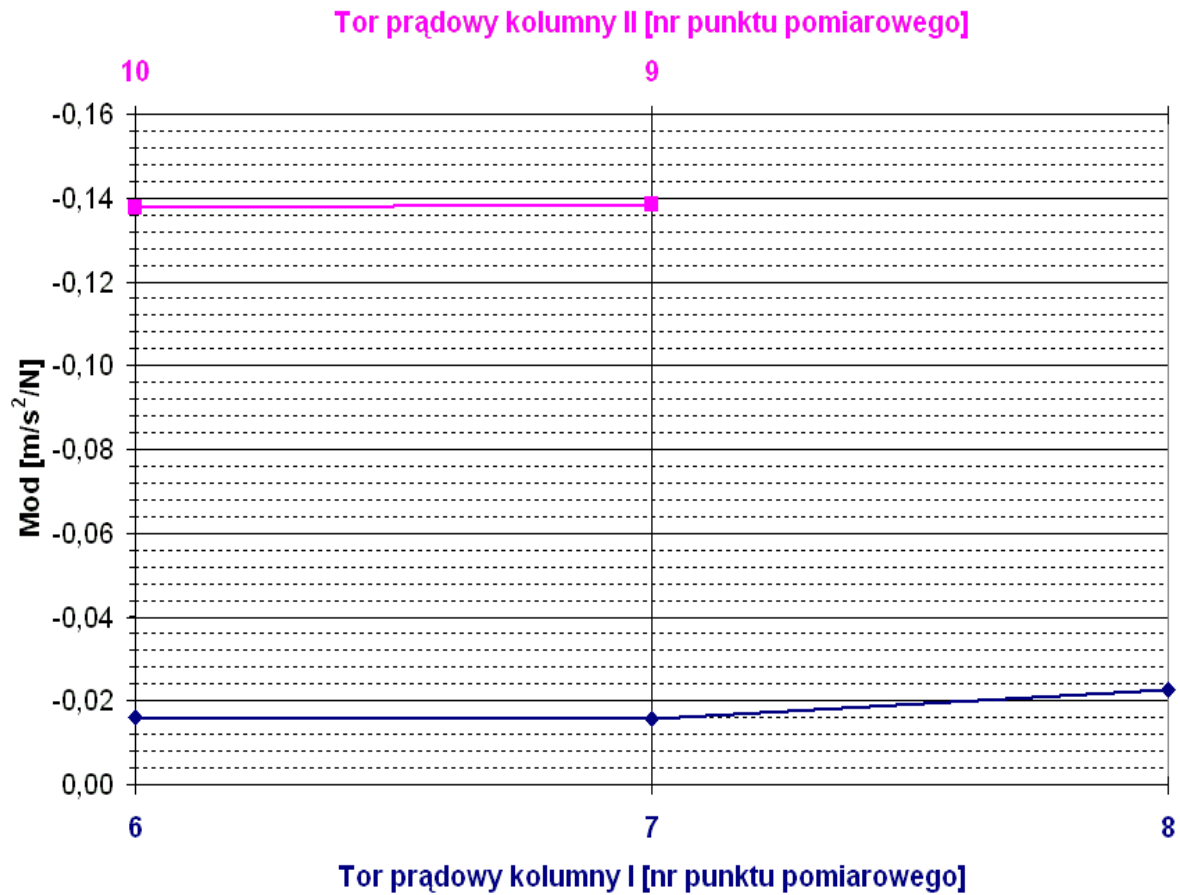
Rys. 3.60. Forma drgań dla $f_{R1} = 10,03$ Hz.

Tabela 3.37 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1X	-0,000539	132,4	0,38%	15X	-0,000994	13,6	3,68%
2X	-0,001538			14X	-0,011082		
3X	-0,004564			13X	-0,041611		
4X	-0,007374			12X	-0,067650		
5X	-0,011289			11X	-0,093921		
6X	-0,015949			10X	-0,137767		

Tabela 3.37. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tory prądowe są w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R1} = 10,03$ Hz przedstawiono na Rys. 3.61.



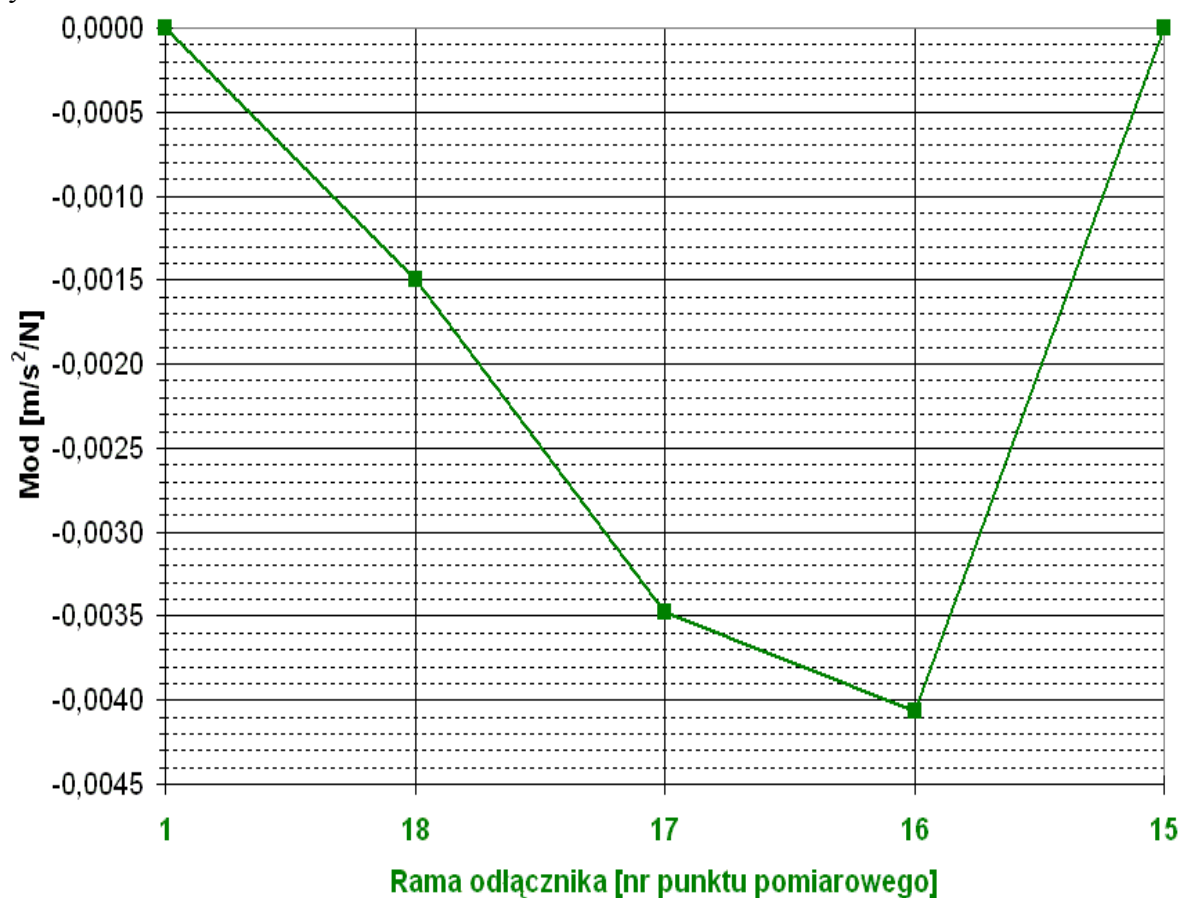
Rys. 3.61. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 10,03$ Hz.

Tabela 3.38 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Kolumna pomiarowa	Punkt i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
		mod [$\text{m/s}^2/\text{N}$]	dobroci Q	tłumienia ξ
I	6X	-0,015949	114,6	0,44%
	7X	-0,015872		
	8X	-0,022717		
II	10X	-0,137767	13,0	3,85%
	9X	-0,138465		

Tabela 3.38. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika jest w rezonansie. Formę drgań rami dla $f_{R1} = 10,03$ Hz przedstawiono na Rys. 3.62.



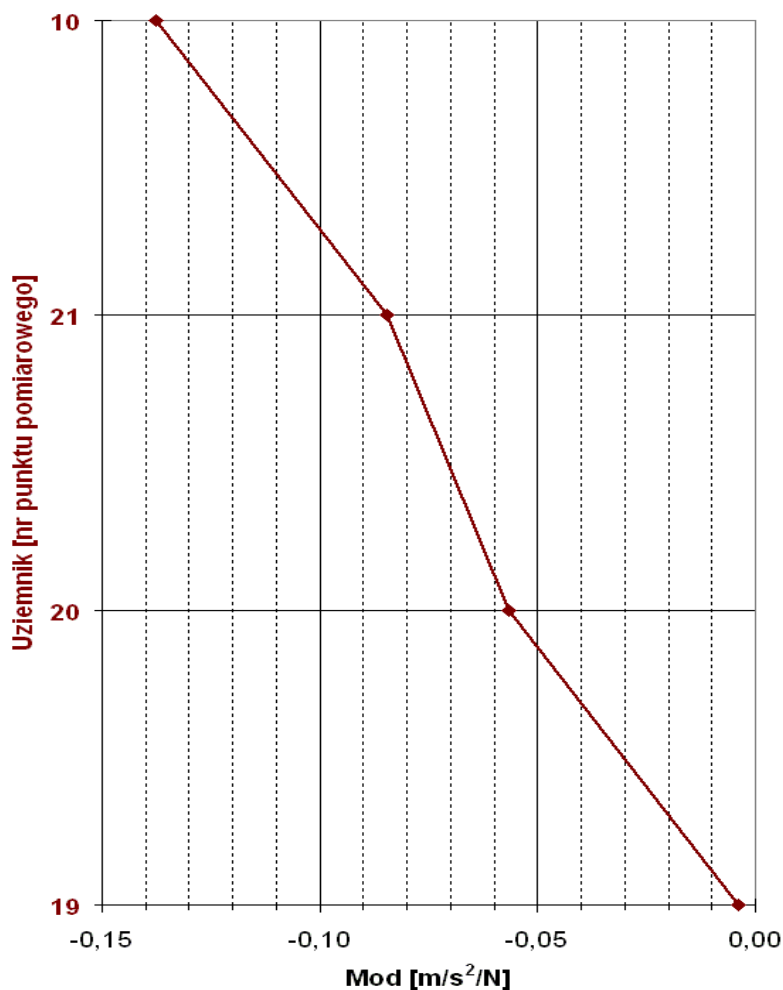
Rys. 3.62. Forma drgań rami oraz uziemnika dla $f_{R1} = 10,03$ Hz.

Tabela 3.39 prezentuje zestawienie formy drgań rami dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Rama odłącznika	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Z	0,000000	36,0	1,39%
18Z	-0,001500		
17Z	-0,003481		
16Z	-0,004070		
15Z	0,000000		

Tabela 3.39. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R1} = 10,03$ Hz przedstawiono na Rys. 3.63.



Rys. 3.63. Forma drgań uziemnika dla $f_{R1} = 10,03$ Hz.

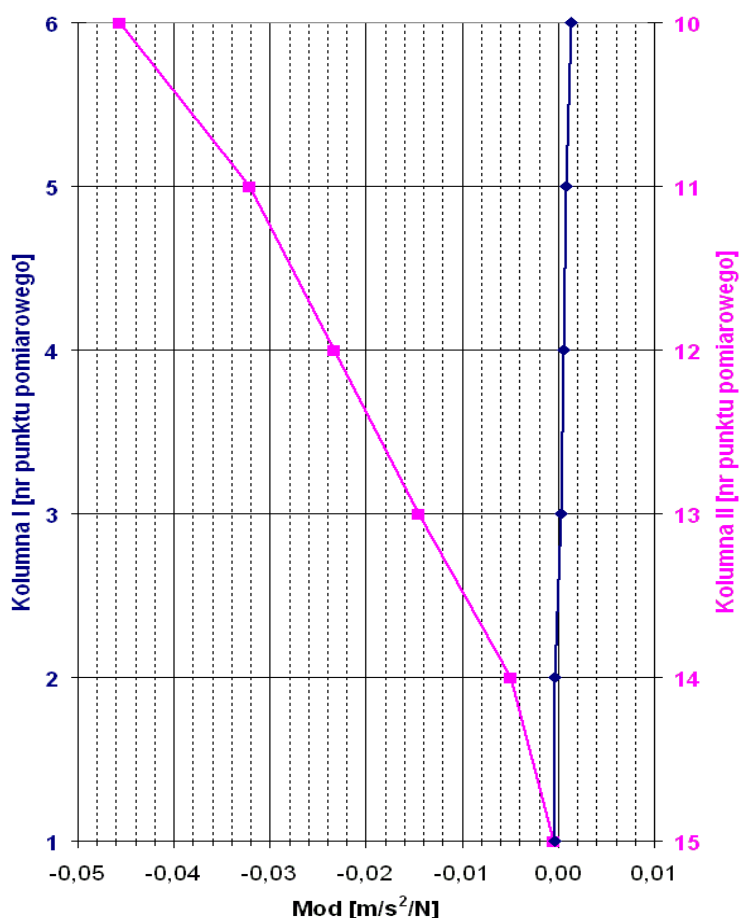
Tabela 3.40 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
19X	-0,003824	15,6	3,20%
20X	-0,056478		
21X	-0,084701		
10X	-0,137767		

Tabela 3.40. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 10,03$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.2.3.7.4 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 13,00$ Hz

Kolumna II jest w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R2} = 13,00$ Hz przedstawiono na Rys. 3.64.



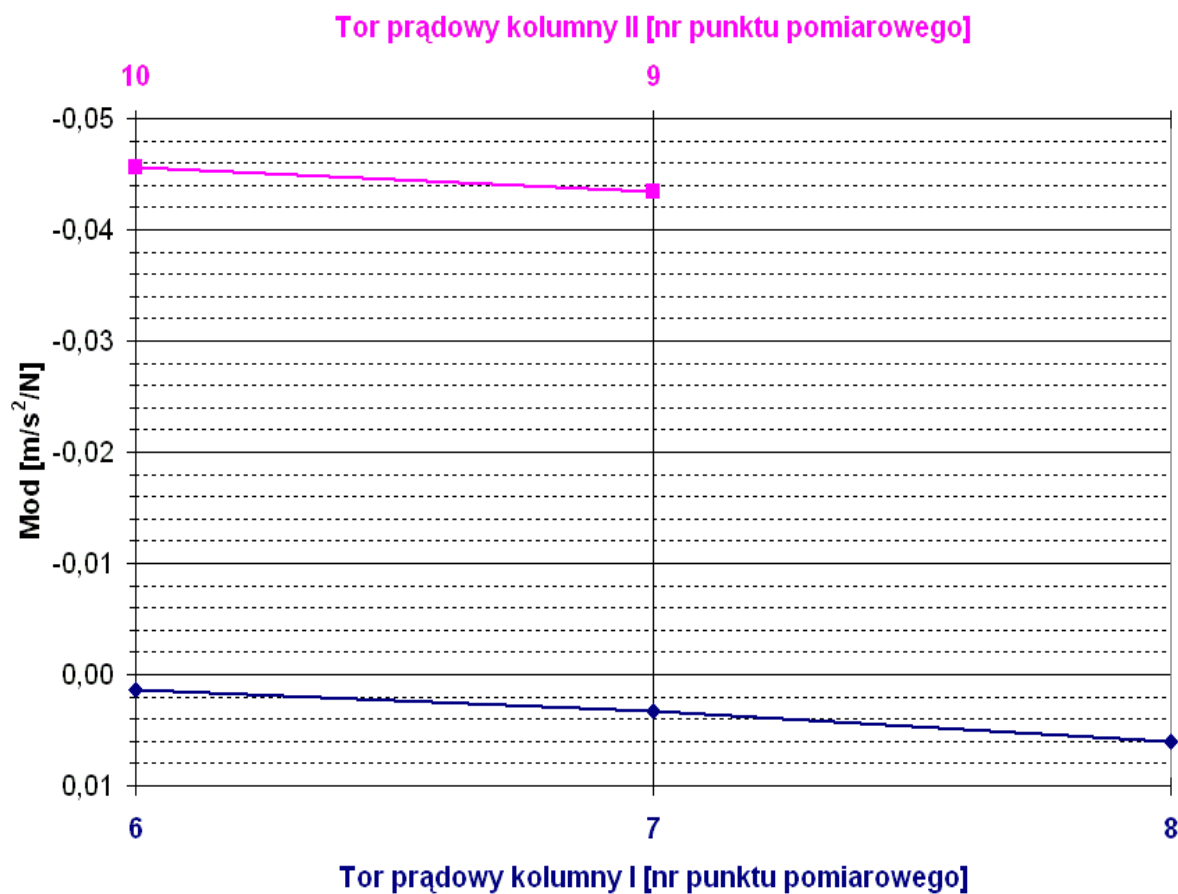
Rys. 3.64. Forma drgań dla $f_{R2} = 13,00$ Hz.

Tabela 3.41 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s²/N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1X	-0,000432	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy	15X	-0,000490	84,0	0,60%
2X	-0,000416			14X	-0,005003		
3X	0,000288			13X	-0,014553		
4X	0,000561			12X	-0,023303		
5X	0,000762			11X	-0,032186		
6X	0,001390			10X	-0,045658		

Tabela 3.41. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Tor prądowy kolumny II jest w rezonansie. Formę drgań torów prądowych dla $f_{R2} = 13,00$ Hz przedstawiono na Rys. 3.65.



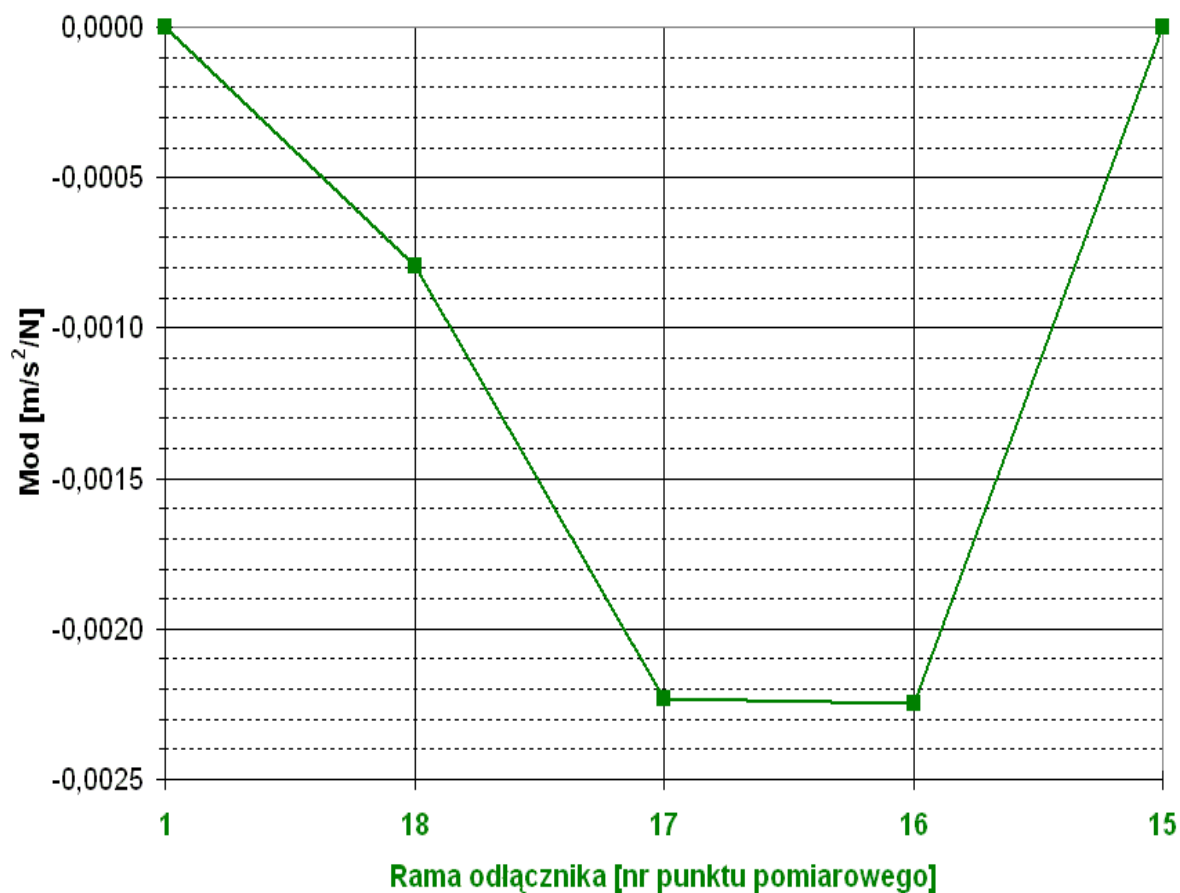
Rys. 3.65. Forma drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 13,00$ Hz.

Tabela 3.42 prezentuje zestawienie formy drgań toru prądowego dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Kolumna pomiarowa	Punkt pomiarowy i składowa	Tory prądowe	Współczynnik	
		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	Tłumienia ξ
I	6X	0,001390	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
	7X	0,003300		
	8X	0,006076		
II	10X	-0,045658	120,7	0,41%
	9X	-0,043470		

Tabela 3.42. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Rama odłącznika nie jest w rezonansie, są to drgania w sprzężeniu. Formę drgań ramy dla $f_{R2} = 13,00$ Hz. przedstawiono na Rys. 3.66.



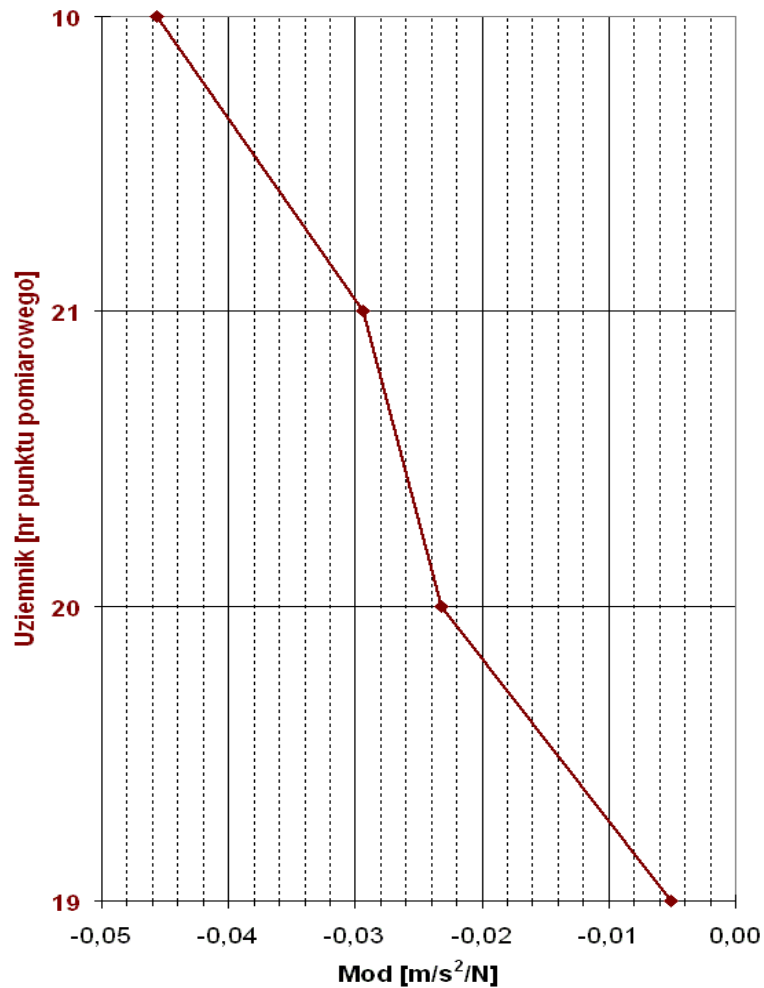
Rys. 3.66. Forma drgań ramy oraz uziemnika dla $f_{R2} = 13,00$ Hz.

Tabela 3.43 prezentuje zestawienie formy drgań ramy dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Rama odłącznika	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
1Z	0,000000	Brak danych do analizy	Brak danych do analizy
18Z	-0,000794		
17Z	-0,002231		
16Z	-0,002246		
15Z	0,000000		

Tabela 3.43. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

Uziemnik jest w rezonansie. Formę drgań uziemnika dla $f_{R2} = 13,00$ Hz przedstawiono na Rys. 3.67.



Rys. 3.67. Forma drgań uziemnika dla $f_{R2} = 13,00$ Hz.

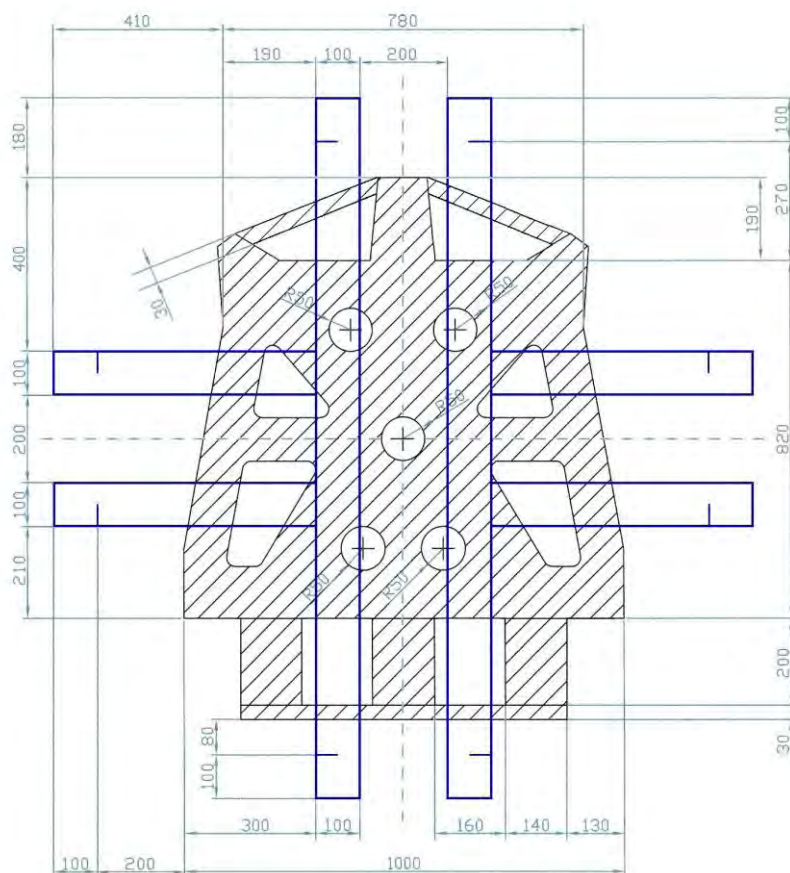
Tabela 3.44 prezentuje zestawienie formy drgań uziemnika dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Uziemnik	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
19X	-0,005049	91,0	0,55%
20X	-0,023186		
21X	-0,029344		
10X	-0,045658		

Tabela 3.44. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 13,00$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.3 Badania impulsowe na stole wstrząsowym

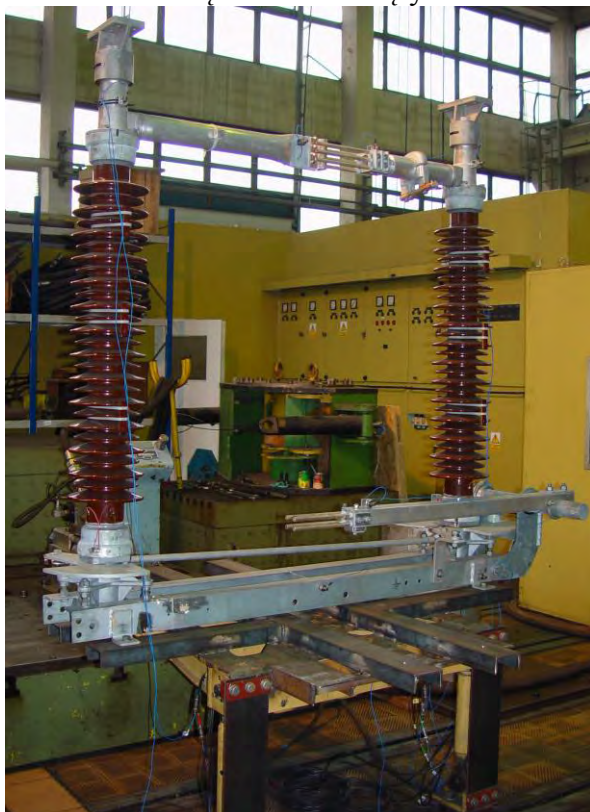
Po wykonaniu badań impulsowych na sztywnym fundamencie przeprowadzono szereg badań impulsowych po zamocowaniu analizowanego odłącznika wysokiego napięcia na stole wstrząsowym. Miało to na celu określenie wpływu sposobu zamocowania konstrukcji odłącznika na zmianę częstotliwości rezonansowych oraz oszacowanie wpływu interakcji ze stołem wstrząsowym, co było konieczne przed przystąpieniem do badań zniszczeniowych opisanych w rozdziale 3.5. Odłącznik zamocowano czterema śrubami M14 i dokręcono kluczem dynamometrycznym (moment dokręcenia 120 Nm) do konstrukcji fundamentu wykonanego z ceowników stalowych C100 o długości 1600 mm i 600 mm przyspawanych do platformy stołu wstrząsowego. Platformę stołu wstrząsowego z ceownikami przedstawiono na Rys. 3.68.



Rys. 3.68. Platforma stołu wstrząsowego z fundamentem z ceowników.

Sposób zamocowania konstrukcji odłącznika do stołu wstrząsowego dla konfiguracji zamkniętej i otwartej, dla kierunku pobudzenia drgań poprzecznego Y oraz wzdłużnego X, przedstawiono na Fot. 3.3 – 3.4.

Odłącznik zamknięty

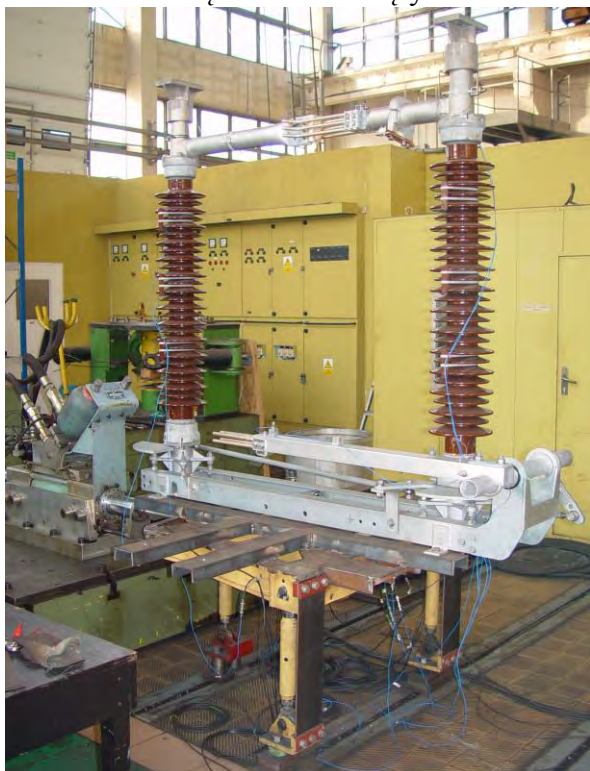


Odłącznik otwarty



Fot. 3.3. Sposób zamocowania odłącznika na stole wstrząsowym w pozycji zamkniętej i otwartej (kierunek pobudzenia drgań poprzeczny, Y).

Odłącznik zamknięty

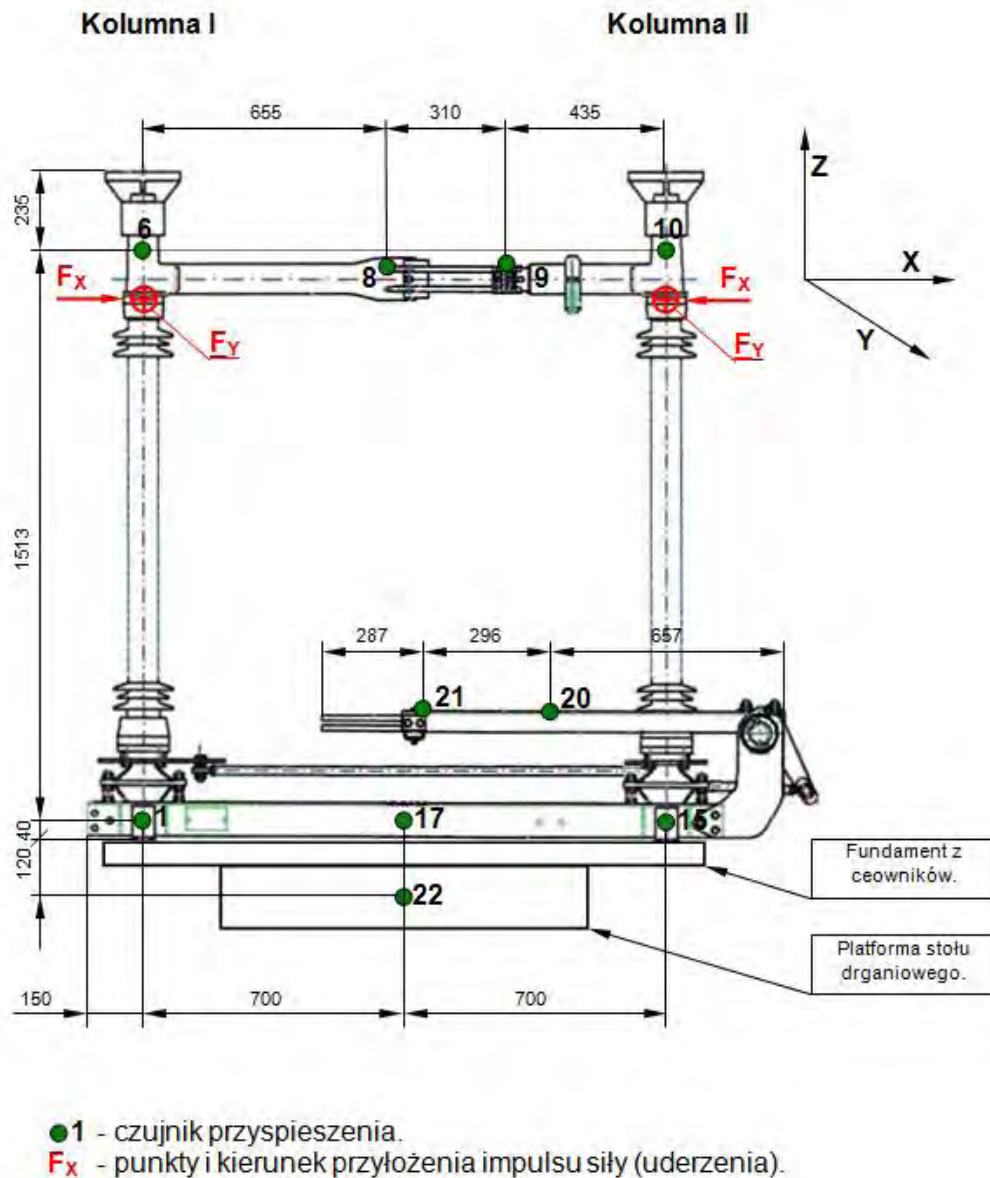


Odłącznik otwarty



Fot. 3.4. Sposób zamocowania odłącznika na stole wstrząsowym w pozycji zamkniętej i otwartej (kierunek pobudzenia drgań wzdłużny, X).

Liczba punktów pomiarowych została zoptymalizowana tak, by zminimalizować liczbę punktów kontrolnych, pozostawiając jednak możliwość oszacowania wpływu zmiany zamocowania na zmianę głównych częstotliwości rezonansowych. Zoptymalizowane rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz punkty przyłożenia impulsu siły pokazano na Rys. 3.69.



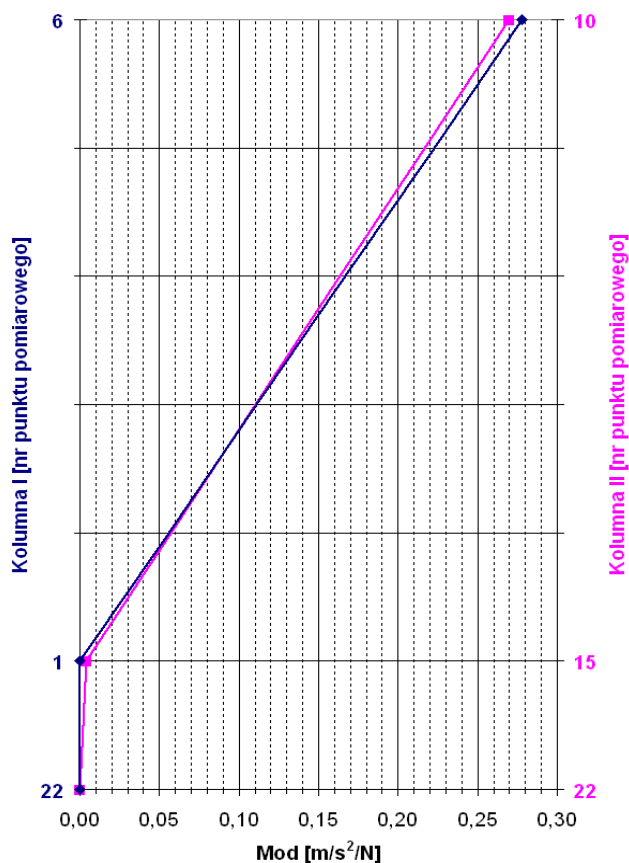
Rys. 3.69. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i punktów przyłożenia siły.

Do oszacowania wpływu zamocowania na zmianę częstotliwości rezonansowych posłużono się formami drgań obu kolumn. Ponieważ wyniki badań impulsowych na sztywnym fundamencie pokazały, że formy i częstotliwości drgań własnych nie zależą w dużym stopniu od tego, do której kolumny przyłożono impuls siły, analizę porównawczą z badaniami impulsowymi na stole wstrząsowym wykonano dla uderzenia w kolumnę I.

3.3.1 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty, uderzenie w kolumnę I

3.3.1.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 6,49$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 6,49$ Hz przedstawiono na Rys. 3.70.



Rys. 3.70. Forma drgań dla $f_{R1} = 6,49$ Hz.

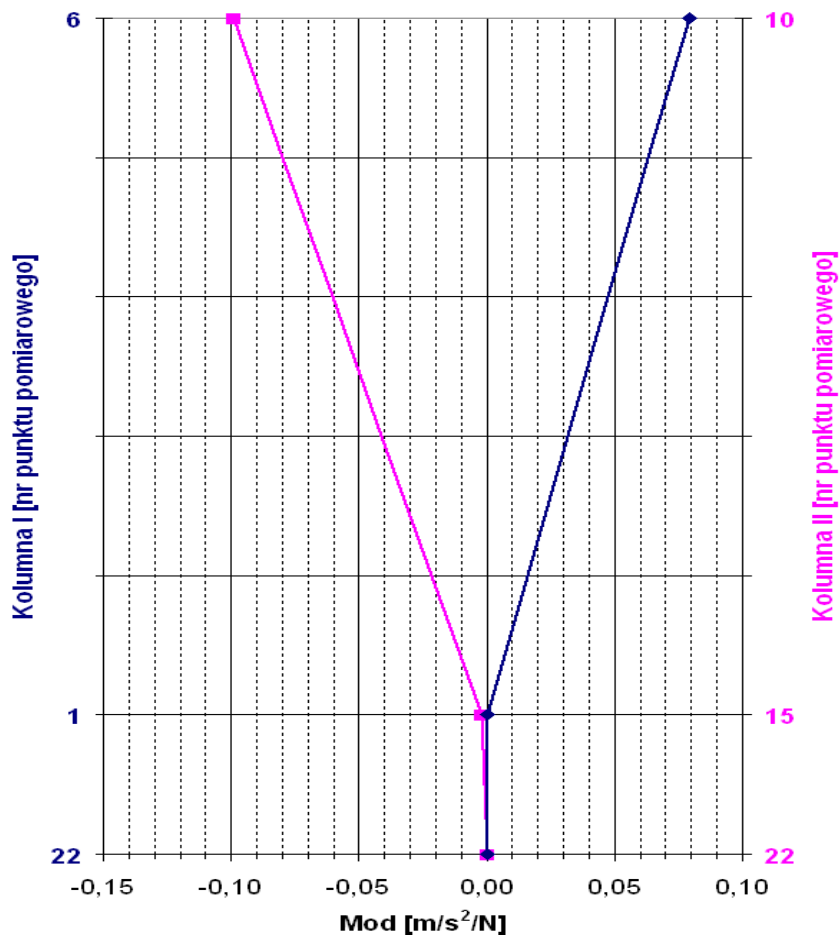
Tabela 3.45 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 6,49$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
22Y	0,000000	BDdA	BDdA	22Y	0,000000	BDdA	BDdA
1Y	0,000000	41,3	1,21%	15Y	0,004264	42,1	1,19%
6Y	0,277915			10Y	0,269777		

Tabela 3.45. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 6,49$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.3.1.2 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R2} = 10,33 \text{ Hz}$

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R2} = 10,33 \text{ Hz}$ przedstawiono na Rys. 3.71.



Rys. 3.71. Forma drgań dla $f_{R2} = 10,33 \text{ Hz}$.

Tabela 3.46 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R2} = 10,33 \text{ Hz}$ wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

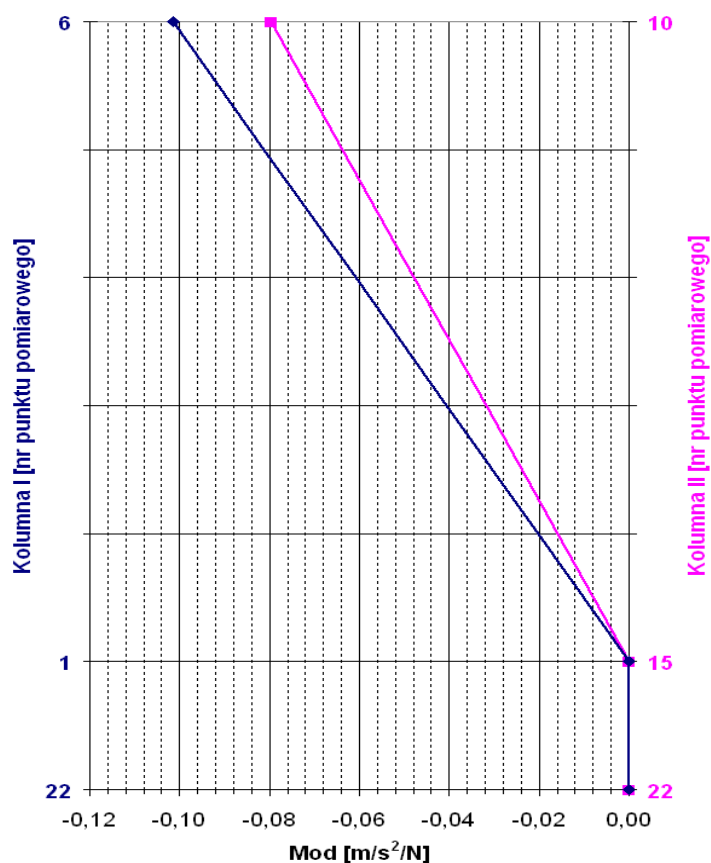
Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I mod [m/s ² /N]	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II mod [m/s ² /N]	Współczynnik	
		dobroci Q	tłumienia ξ			dobroci Q	tłumienia ξ
22X	0,000000	BDdA	BDdA	22X	0,000000	BDdA	BDdA
1X	0,000000	52,0	0,96%	15X	-0,002251	52,4	0,95%
6X	0,079027			10X	-0,099165		

Tabela 3.46. Zestawienie formy drgań dla $f_{R2} = 10,33 \text{ Hz}$ wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.3.2 Kierunek pobudzenia drgań wzdluzny X, odlacznik zamkniety, uderzenie w kolumnę I

3.3.2.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 8,50$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 8,50$ Hz przedstawiono na Rys. 3.72.



Rys. 3.72. Forma drgań dla $f_{R1} = 8,50$ Hz.

Tabela 3.47 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 8,50$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

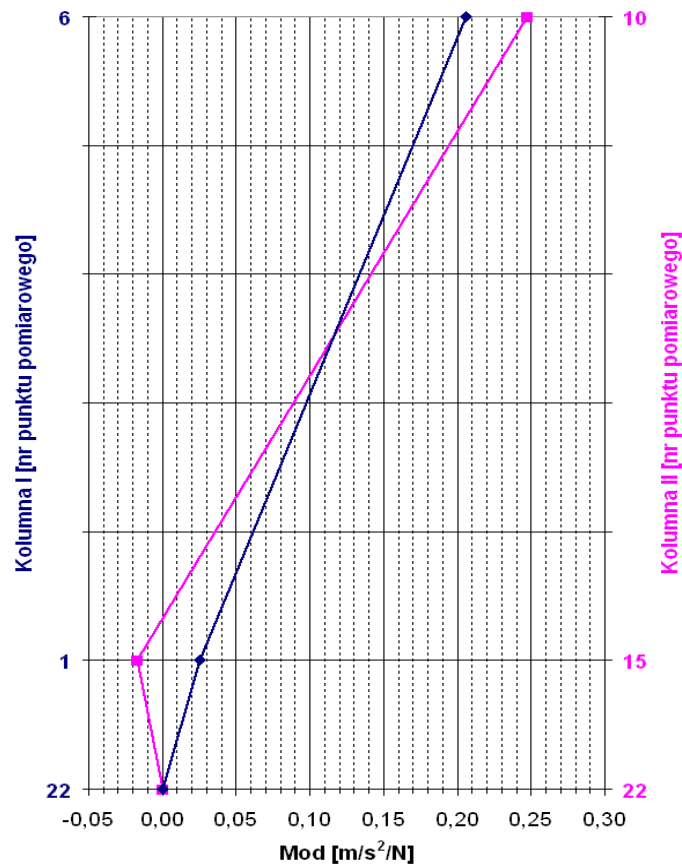
Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
22X	0,000000	BDdA	BDdA	22X	0,000000	BDdA	BDdA
1X	0,000000	50,7	0,99%	15X	0,000000	28,6	1,75%
6X	-0,101502			10X	-0,079700		

Tabela 3.47. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 8,50$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.3.3 Kierunek pobudzenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I

3.3.3.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 6,37$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 6,37$ Hz przedstawiono na Rys. 3.73.



Rys. 3.73. Forma drgań dla $f_{R1} = 6,37$ Hz.

Tabela 3.48 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 6,37$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

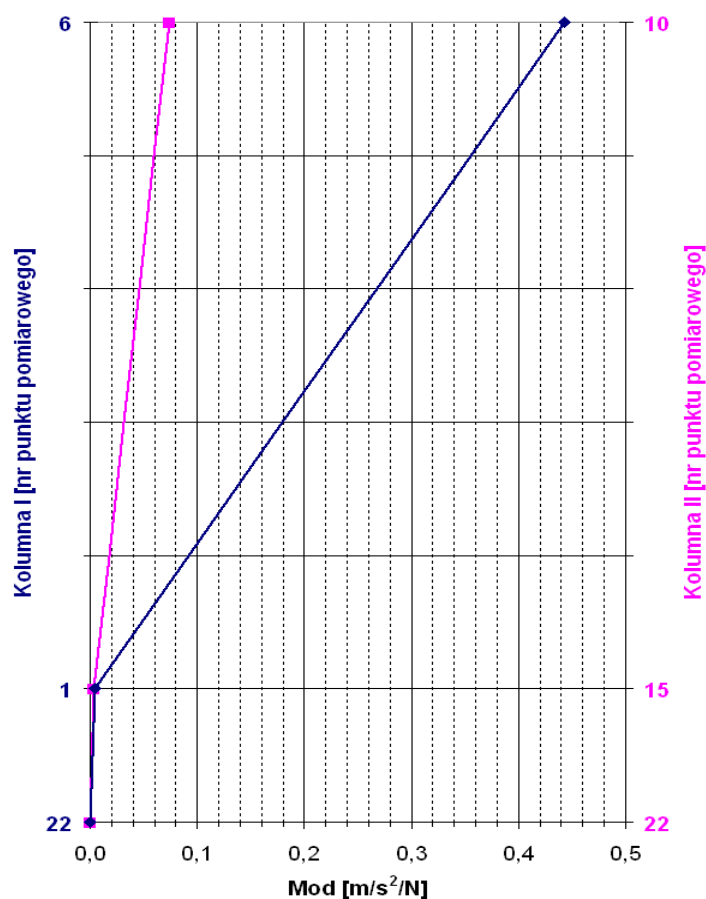
Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I		Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II		Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ	
22Y	0,000000	BDdA	BDdA		22Y	0,000000	BDdA	BDdA	
1Y	0,025716	28,8	1,74%		15Y	-0,017183	28,7	1,74%	
6Y	0,205766			10Y	0,247314				

Tabela 3.48. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 6,37$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.3.4 Kierunek pobudzenia drgań wzdlużny X, odłącznik otwarty, uderzenie w kolumnę I

3.3.4.1 Wyniki dla częstotliwości rezonansowej $f_{R1} = 8,86$ Hz

Kolumna I i II są w rezonansie. Formę drgań kolumn dla $f_{R1} = 8,86$ Hz przedstawiono na Rys. 3.74.



Rys. 3.74. Forma drgań dla $f_{R1} = 8,86$ Hz.

Tabela 3.49 prezentuje zestawienie formy drgań obu kolumn dla $f_{R1} = 8,86$ Hz wraz z wyznaczonymi współczynnikami dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna I	Współczynnik		Punkt pomiarowy i składowa	Kolumna II	Współczynnik	
	mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ		mod [m/s ² /N]	dobroci Q	tłumienia ξ
22X	0,000000	BDdA	BDdA	22X	0,000000	BDdA	BDdA
1X	0,004437	29,9	1,67%	15X	0,003527	21,9	2,28%
6X	0,442915			10X	0,073712		

Tabela 3.49. Zestawienie formy drgań dla $f_{R1} = 8,86$ Hz wraz ze współczynnikami dobroci i tłumienia.

3.3.5 Zestawienie wyników badań impulsowych na sztywnym fundamencie oraz na stole wstrząsowym

Tabela 3.50 zestawia wyniki badań impulsowych, prezentując podstawowe formy drgań własnych konstrukcji odłącznika zamkniętego na sztywnym fundamencie oraz na stole wstrząsowym.

WYNIKI BADAŃ IMPULSOWYCH DLA ODŁĄCZNIKA ZAMKNIĘTEGO					
NA SZTYWNYM FUNDAMENCIE			NA STOLE WSTRZĄSOWYM		
Kierunek	poprzeczny Y	Częstotliwość Hz	Forma	Częstotliwość Hz	Forma
	Kierunek poprzeczny Y	$F_{R1}=9,83$		$F_{R1}=6,49$	
		$F_{R2}=15,58$		$F_{R2}=10,33$	
Kierunek wzdłużny X	$F_{R1}=12,93$		$F_{R1}=8,50$		

Tabela 3.50. Zestawienie wyników badań impulsowych na sztywnym fundamencie i stole wstrząsowym dla odłącznika zamkniętego.

Tabela 3.51 zestawia wyniki badań impulsowych, prezentując podstawowe formy drgań własnych konstrukcji odłącznika otwartego na sztywnym fundamencie oraz na stole wstrząsowym.

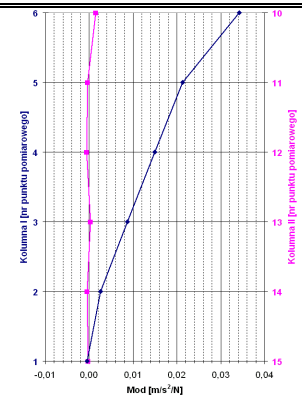
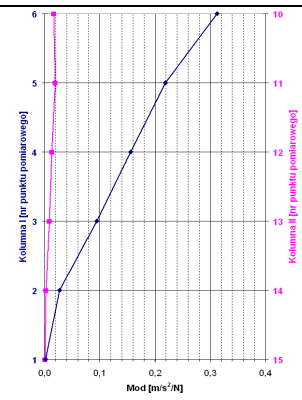
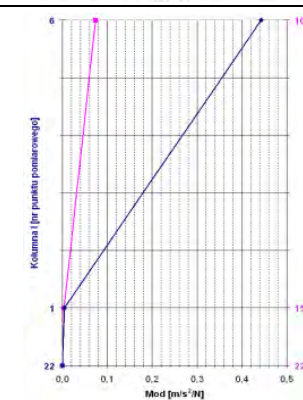
WYNIKI BADAŃ IMPULSOWYCH DLA ODŁĄCZNIKA OTWARTEGO				
NA SZTYWNYM FUNDAMENCIE			NA STOLE WSTRZĄSOWYM	
Kierunek	Częstotliwość Hz	Forma	Częstotliwość Hz	Forma
	Kierunek poprzeczny Y	$F_{R1}=8,45$		$F_{R1}=6,37$
Kierunek wzdłużny X	$F_{R1}=9,11$		$F_{R1}=8,86$	

Tabela 3.51. Zestawienie wyników badań impulsowych na sztywnym fundamencie i stole wstrząsowym dla odłącznika otwartego.

Wyniki przedstawione w Tabeli 3.50 oraz 3.51 jednoznacznie wskazują, iż sposób zamocowania ramy podstawy odłącznika wysokiego napięcia ma istotny wpływ na wartości częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Ze względu na podatność stołu wstrząsowego oraz interakcję drgań pomiędzy stołem a odłącznikiem, zamocowane do stołu urządzenie wykazuje spadek wartości częstotliwości drgań własnych w porównaniu do sytuacji, gdy odłącznik zamocowany jest to sztywnego fundamencie. W przypadku odłącznika zamkniętego, spadek dominujących częstotliwości drgań własnych wyniósł 34,0%, 33,7% oraz 34,3%, odpowiednio dla formy poprzecznej, skrętniej (druga forma poprzeczna) oraz wzdłużnej drgań konstrukcji (patrz Tabela 3.50). Z kolei, w przypadku odłącznika w konfiguracji otwartej, spadki dominujących częstotliwości drgań własnych wyniosły: 24,6% oraz 2,7%, odpowiednio dla formy poprzecznej oraz wzdłużnej drgań konstrukcji (patrz Tabela 3.51).

3.4 Badania sweep-sine

Po przeprowadzeniu badań impulsowych wykonano szereg kolejnych testów eksperymentalnych. Stanowiskiem badawczym pozostał stół wstrząsowy opisany powyżej. W niniejszym rozdziale opisano testy, dla których pobudzenie dynamiczne konstrukcji odłącznika realizowane było wymuszaniem drgań sinusoidalnych o zmiennej (rosnącej) częstotliwości, tzw. test sweep-sine (zob. np. Chopra 1995, Jankowski 2010, Burkacki i Jankowski 2012).

3.4.1 Warianty pomiarowe

Wymuszenie generowane było przez wzbudnik hydrauliczny dla trzech wzajemnie prostopadłych kierunków. Warianty pomiarowe nazwano:

kierunek wymuszenia drgań poziomy wzdłużny X:

- odłącznik zamknięty,
- odłącznik otwarty,

kierunek wymuszenia drgań poziomy poprzeczny Y:

- odłącznik zamknięty,
- odłącznik otwarty,

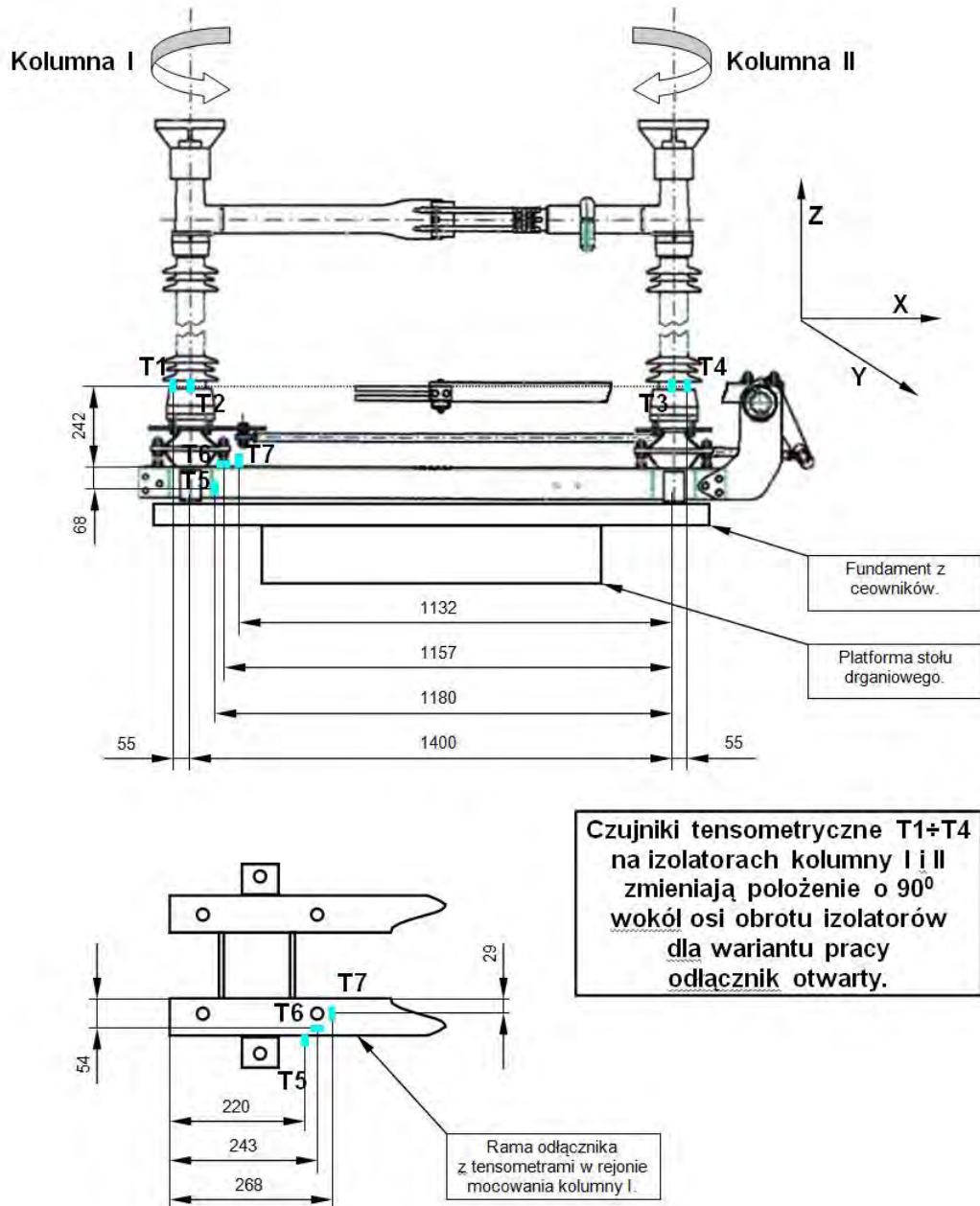
kierunek wymuszenia drgań pionowy Z:

- odłącznik zamknięty,
- odłącznik otwarty.

Rozmieszczenie zastosowanych czujników do pomiaru przyspieszeń przedstawiono na Rys. 3.69. Dodatkowo, wyznaczono szereg punktów kontrolnych do pomiaru odkształceń, uwzględniając warianty pracy odłącznika. Punkty te zlokalizowane były w następujących miejscach (patrz Rys. 3.75):

- u podstawy ceramicznego izolatora kolumny I (dwa tensometry w płaszczyznach prostopadłych do siebie z równoległym kierunkiem mierzonych wartości względem osi kolumny),
- u podstawy ceramicznego izolatora kolumny II (dwa tensometry w płaszczyznach prostopadłych do siebie z równoległym kierunkiem mierzonych wartości względem osi kolumny),

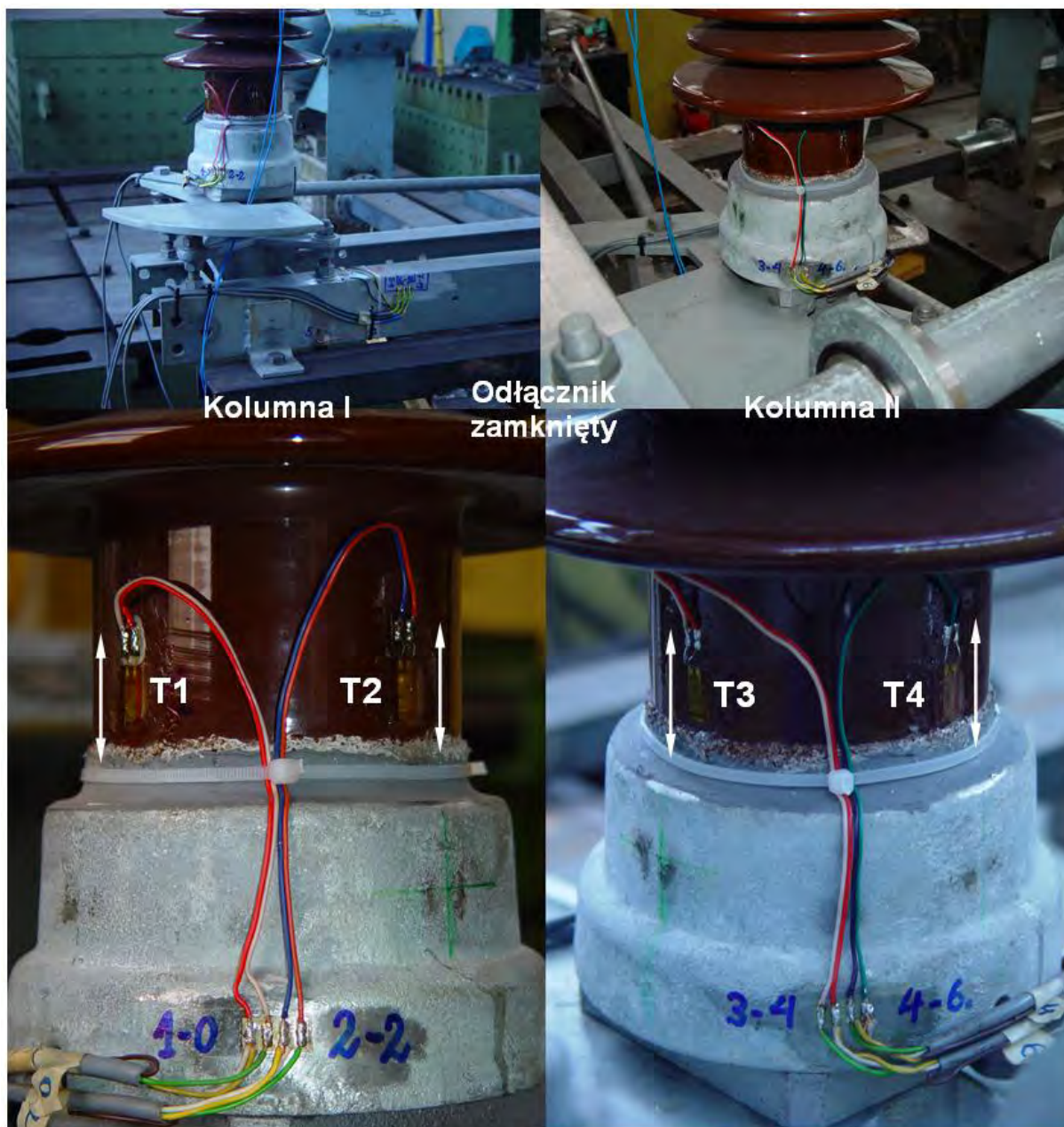
- na stalowej ramie odłącznika w pobliżu zamocowania konstrukcji kolumny I (trzy tensometry w płaszczyznach nawzajem prostopadłych do siebie z równoległym kierunkiem mierzonych wartości względem osi wymuszenia drgań).



■ T1 - czujnik naprężeń.

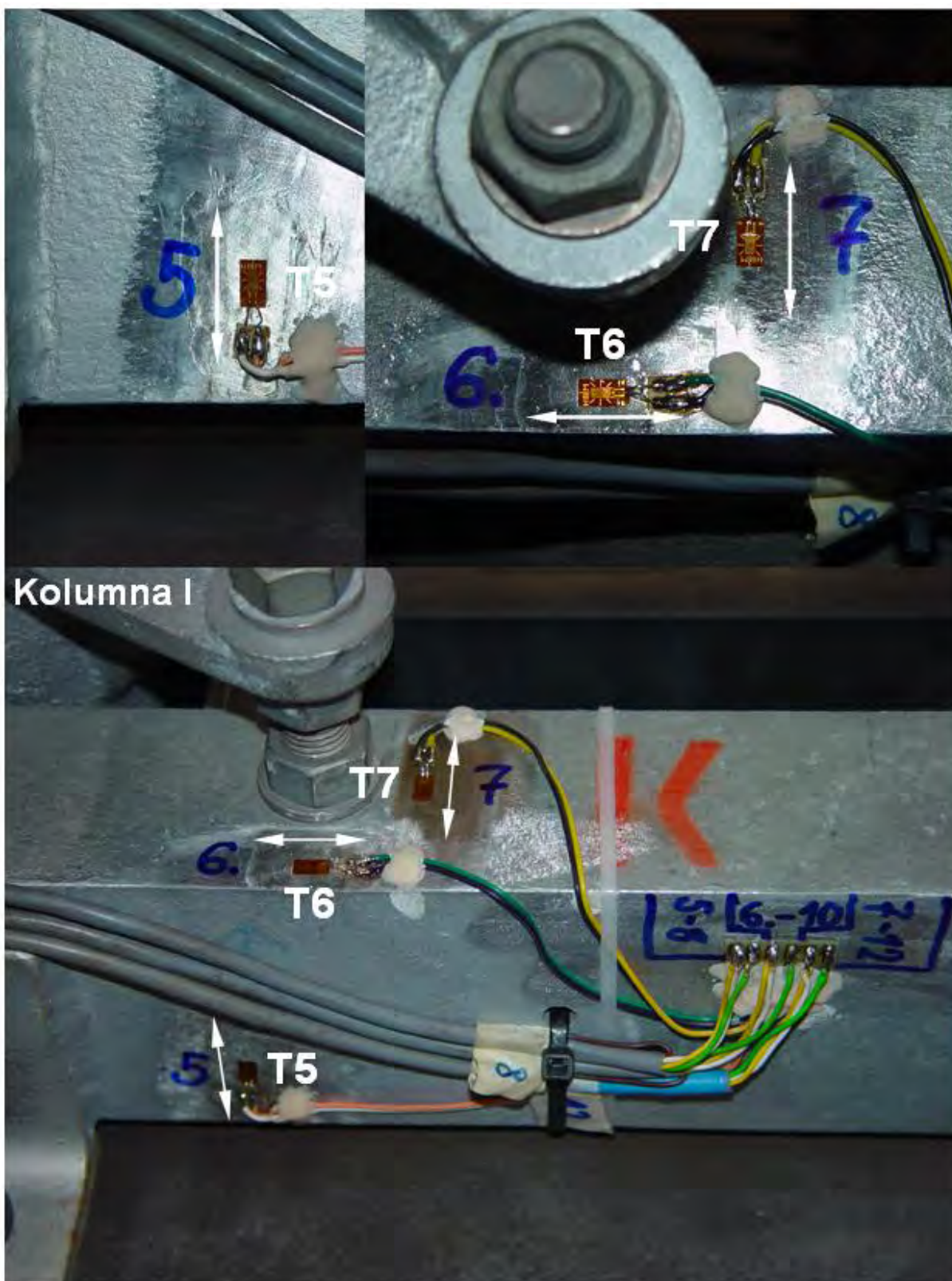
Rys. 3.75. Rozmieszczenie punktów pomiarowych odkształceń.

Na Fot. 3.5-3.12 przedstawiono topologię stanowiska badawczego dla testów sweep-sine.

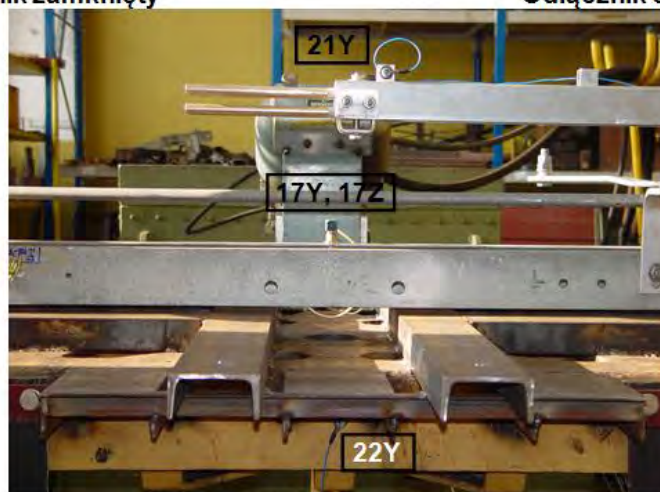
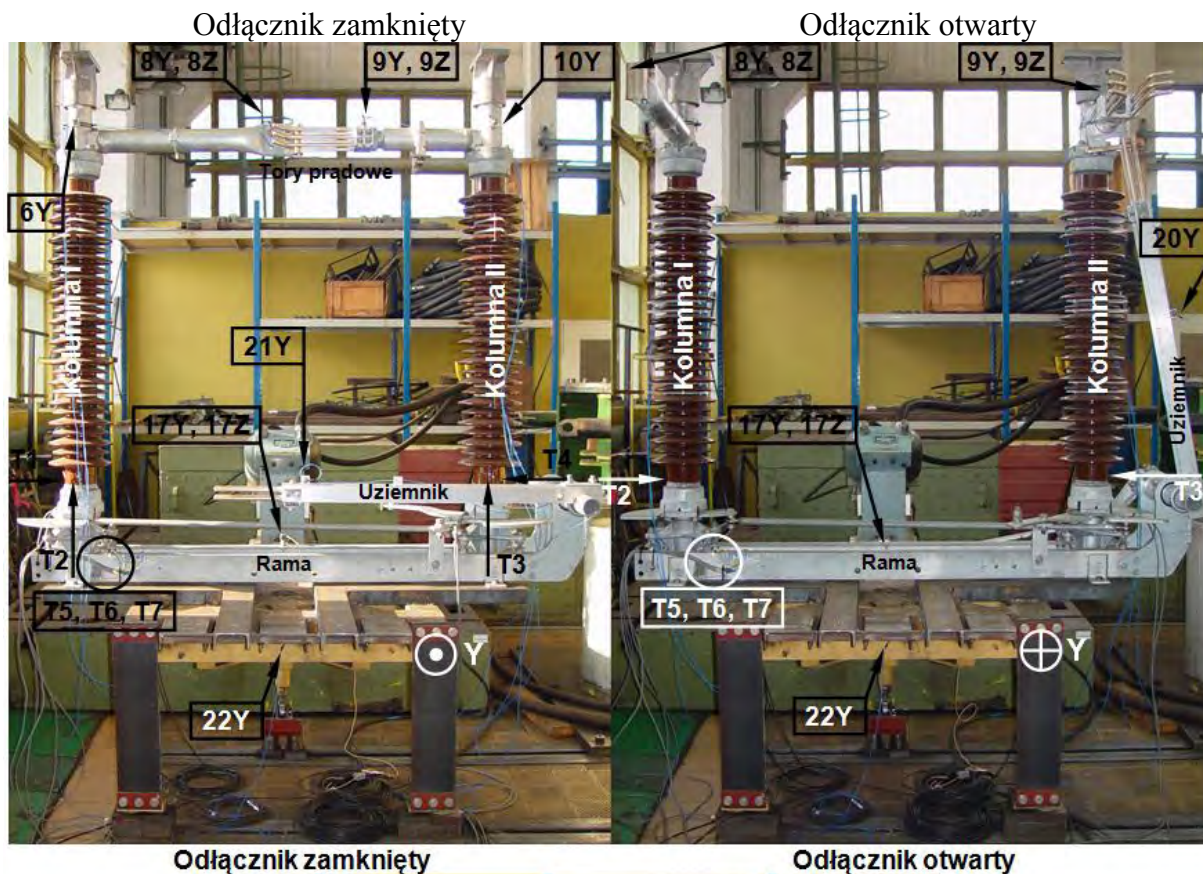


Czujniki tensometryczne T1÷T4 na izolatorach kolumny I i II zmieniają położenie o 90° w pkót osi obrotów dla wariantu pracy odłącznik otwarty.

Fot. 3.5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych odkształceń i kierunki mierzonych wartości na izolatorach kolumny I i II.

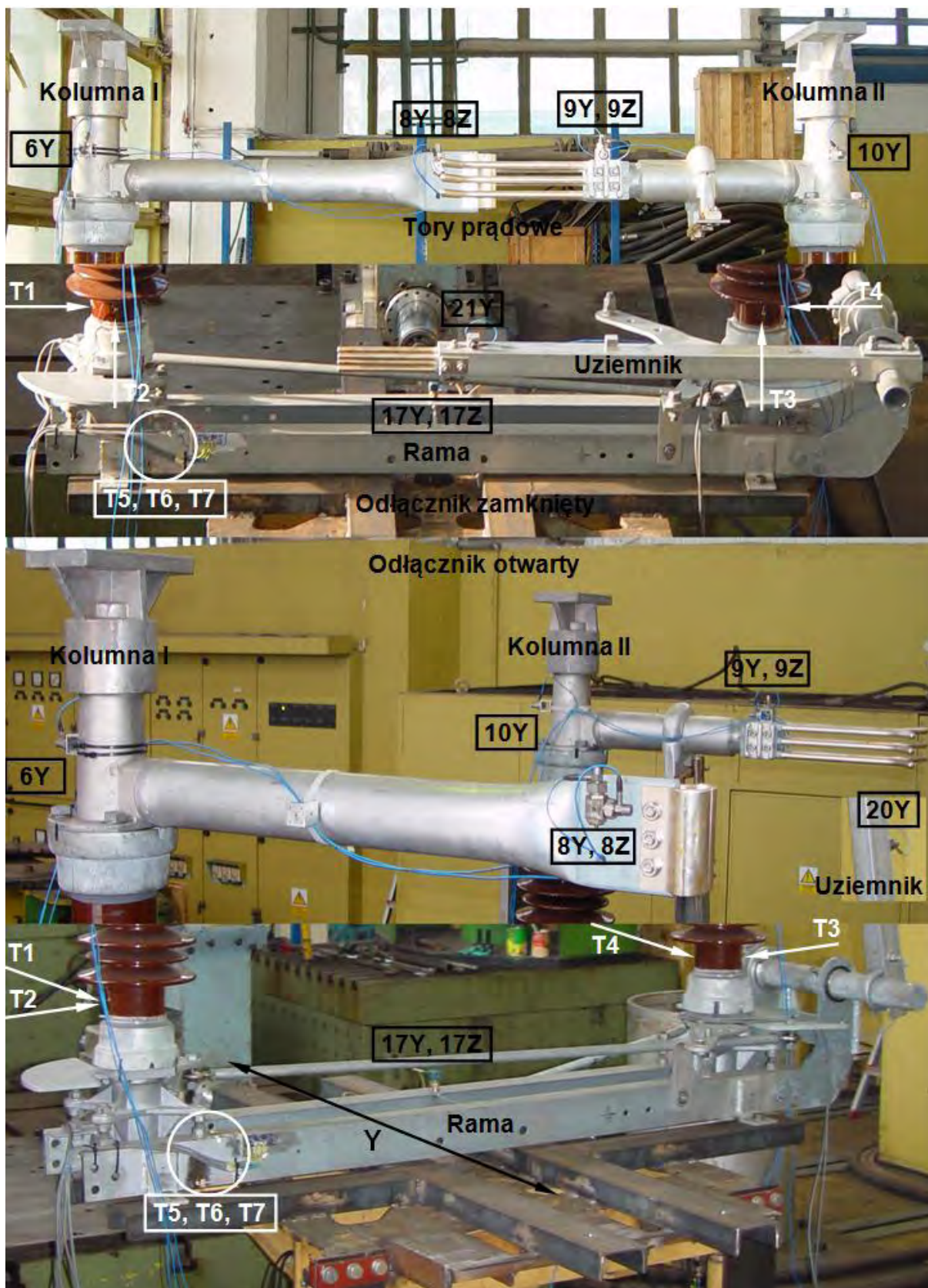


Fot. 3.6. Rozmieszczenie punktów pomiarowych odkształceń i kierunki mierzonych wartości na ramie odłącznika w rejonie mocowania kolumny I.

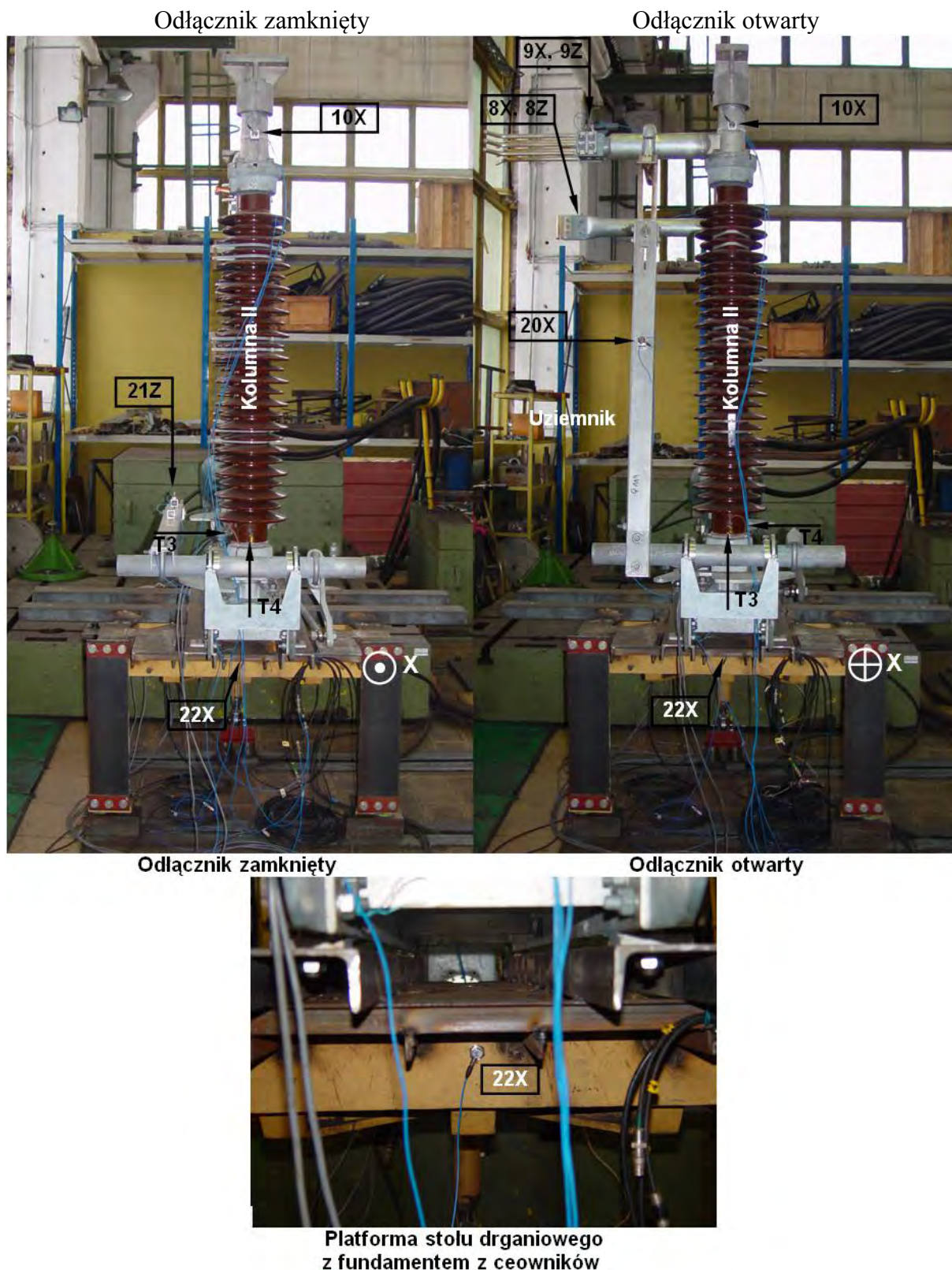


**Platforma stołu drganiowego
z fundamentem z ceowników**

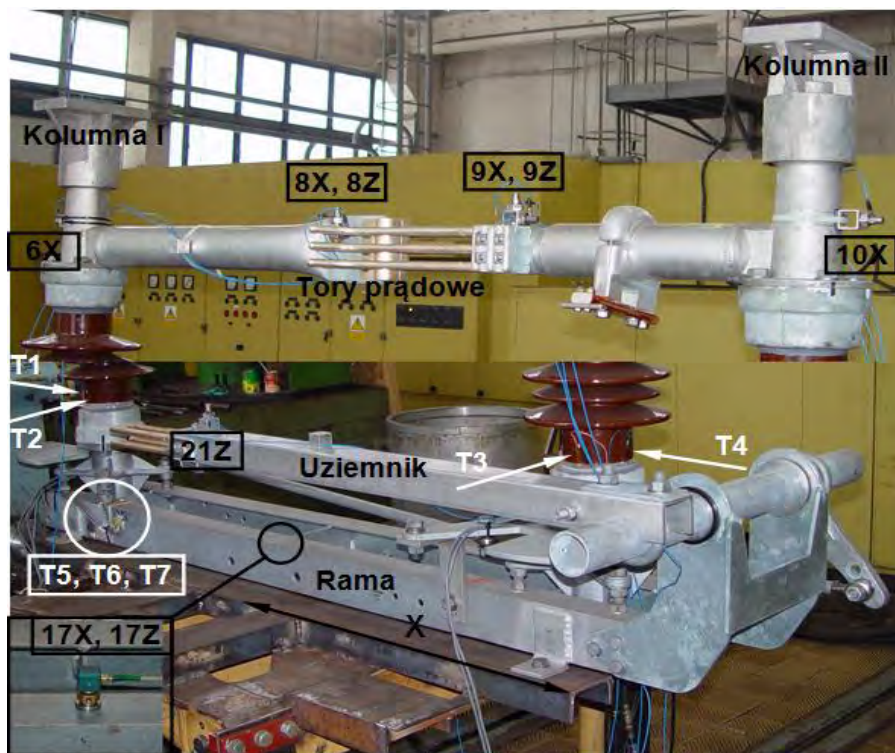
Fot. 3.7. Sposób zamocowania odłącznika i rozmieszczenie punktów pomiarowych dla kierunku wymuszenia drgań poziomego poprzecznego Y.



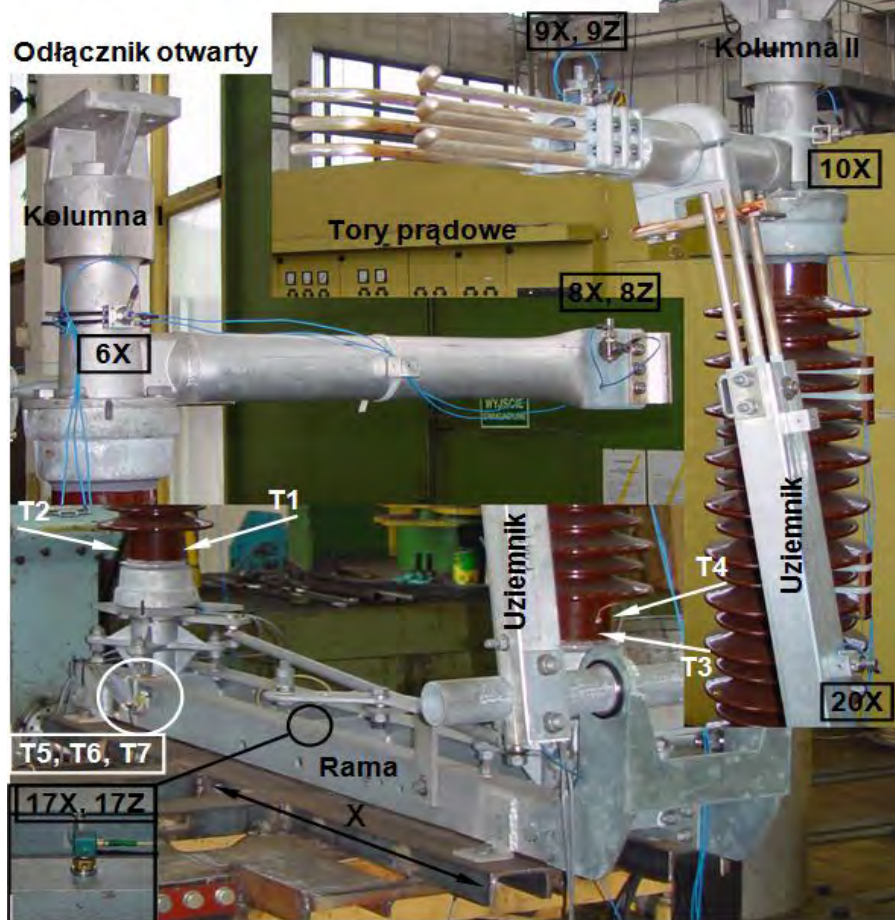
Fot. 3.8. Sposób zamocowania odłącznika i rozmieszczenie punktów pomiarowych dla kierunku wymuszenia drgań poziomego poprzecznego Y.



Fot. 3.9. Sposób zamocowania odłącznika i rozmieszczenie punktów pomiarowych dla kierunku wymuszenia drgań poziomego wzdłużnego X.



Odłącznik zamknięty

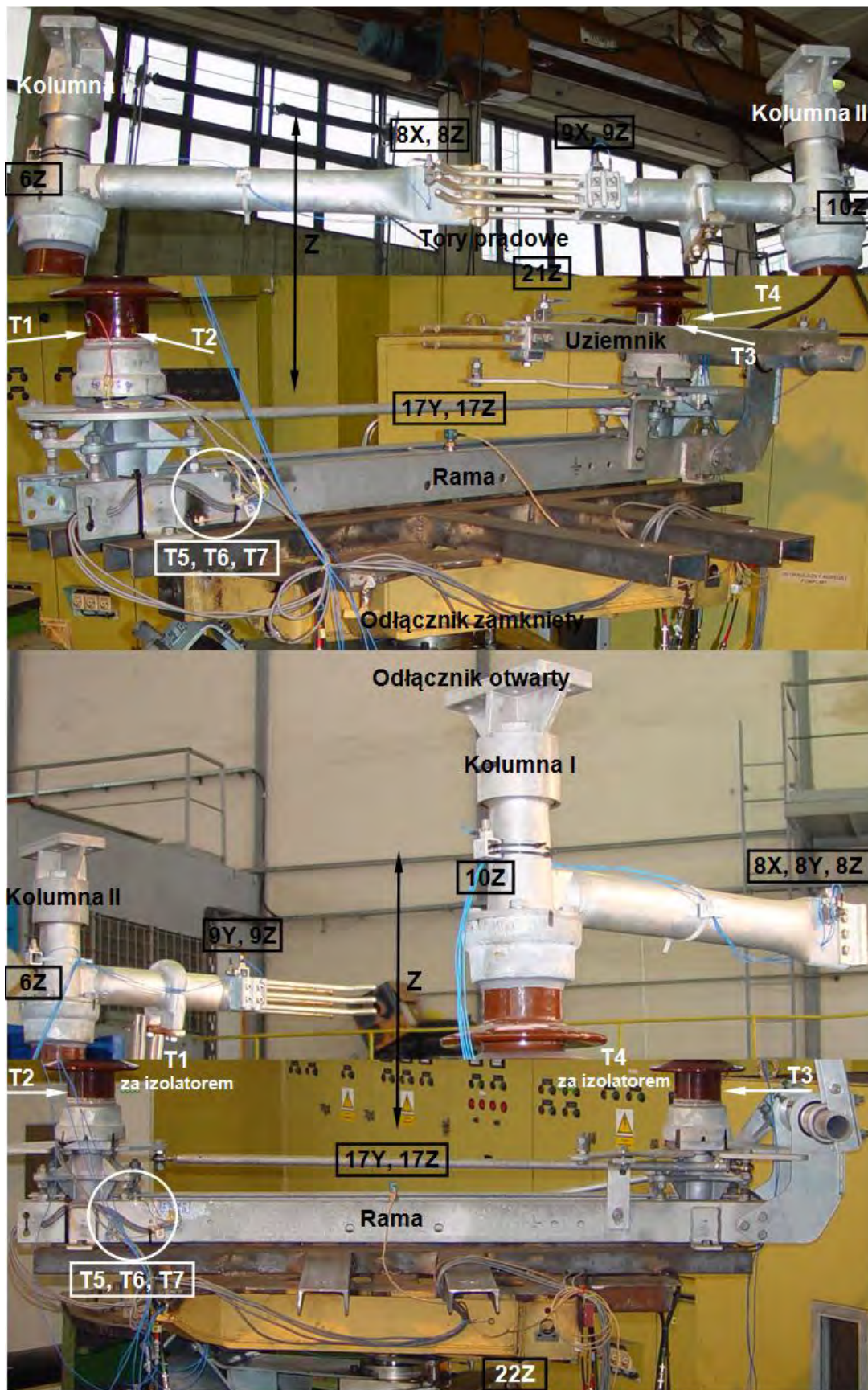


Odłącznik otwarty

Fot. 3.10. Sposób zamocowania odłącznika i rozmieszczenie punktów pomiarowych dla kierunku wymuszenia drgań poziomego wzdłużnego X.

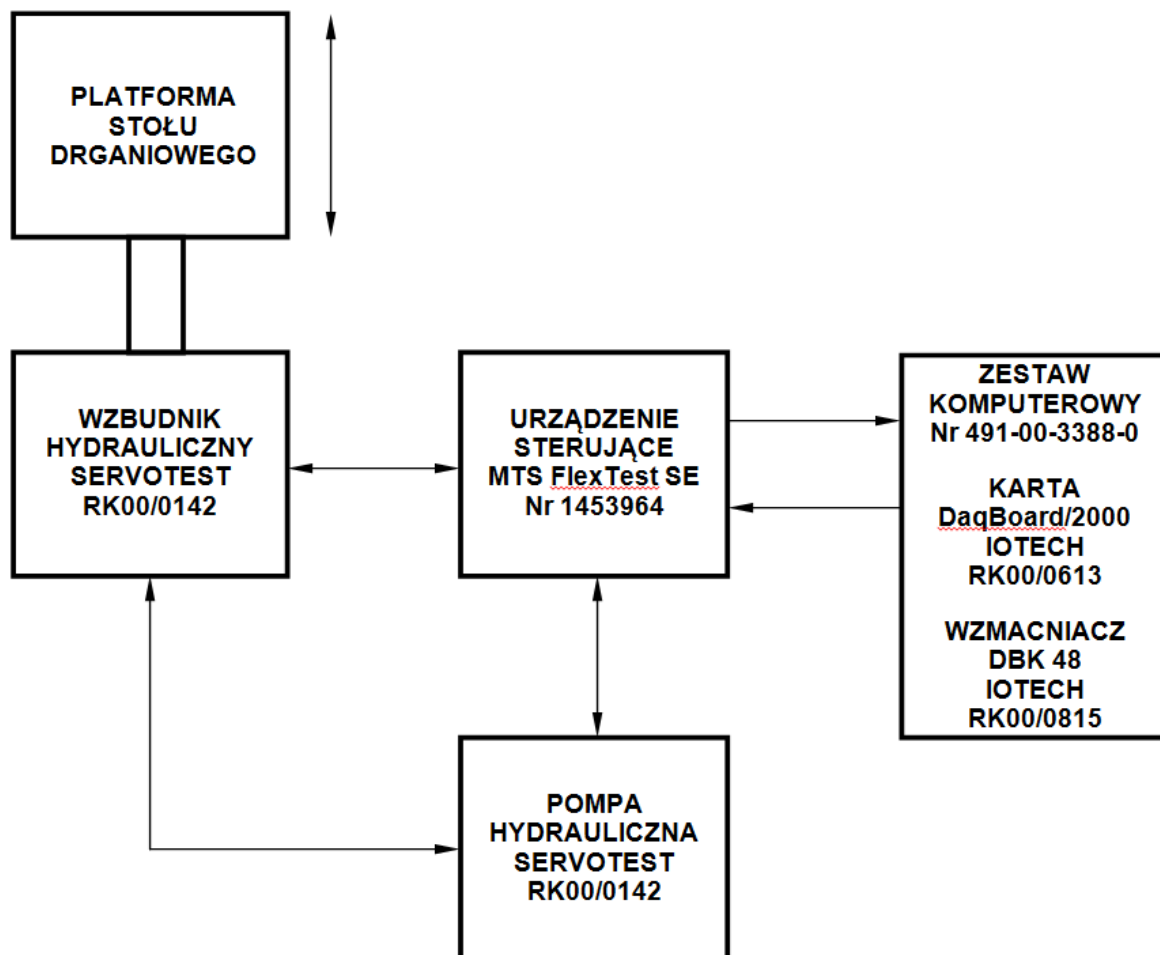


Fot. 3.11. Sposób zamocowania odłącznika i rozmieszczenie punktów pomiarowych dla kierunku wymuszenia drgań pionowego Z.

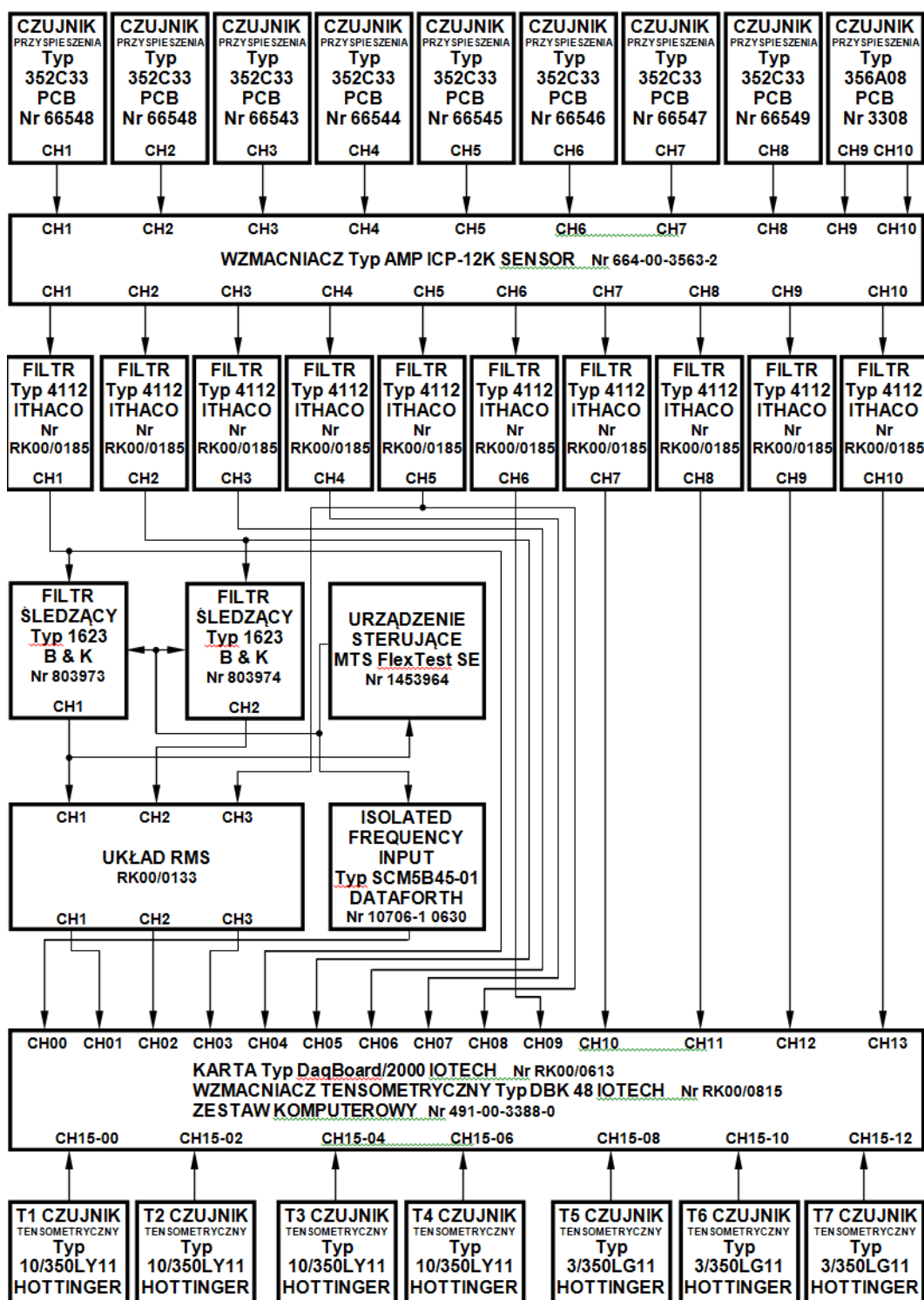


Fot. 3.12. Sposób zamocowania odłącznika i rozmieszczenie punktów pomiarowych dla kierunku wymuszenia drgań pionowego Z.

Na Rys. 3.76 - 3.77 przedstawiono schemat blokowy do generowania drgań sinusoidalnych o zmiennej amplitudzie oraz schemat blokowy układu do pomiaru i rejestracji danych.



Rys. 3.76. Schemat blokowy układu do generowania drgań sinusoidalnych.



Rys. 3.77 Schemat blokowy układu do pomiaru i rejestracji danych.

3.4.2 Analiza pomiarów badania właściwości dynamicznych

Sygnaly pomiarowe zarejestrowane podczas badan sweep-sine poddano wstepnej ocenie i obróbce, a nastepnie analizie.

3.4.2.1 Analiza pomiarów przyspieszeń

Zarejestrowane sygnaly przyspieszeń poddano cyfrowej filtracji filtrem nadążnym (śledzącym) w dziedzinie częstotliwości. Następnie wykonano obliczenia charakterystyk dynamicznych przyspieszenia RMS w dziedzinie częstotliwości. W dalszej kolejności przeanalizowano otrzymane charakterystyki w celu określenia występowania rezonansów i powiększenia drgań oraz wyznaczenia współczynników tłumienia. Do określenia występowania rezonansów i powiększenia drgań przyjęto metodę stosunku charakterystyki dynamicznej danego punktu pomiarowego konstrukcji do charakterystyki dynamicznej punktu odniesienia, czyli platformy stołu wstrząsowego. Na podstawie wyników występowania rezonansów i powiększenia drgań wyznaczono współczynniki tłumienia w odniesieniu do maksimum powiększenia drgań i szerokości rezonansu stosując metodę połowy mocy (zob. Clough i Penzien 1993). W wyniku analizy otrzymano charakterystyki dynamiczne przyspieszenia RMS i charakterystyki dynamiczne powiększenia drgań w dziedzinie częstotliwości w zakresie $2,25 \div 35$ Hz z parametrami rezonansów dla poszczególnych punktów pomiarowych odłącznika. Jako kryterium występowania rezonansów przyjęto powiększenie drgań większe od 2.

3.4.2.2 Analiza pomiarów naprężeń

Celem analizy pomiarów naprężeń było wyznaczenie wartości naprężeń maksymalnych i minimalnych oraz odpowiadających im częstotliwości w danym punkcie pomiarowym. Zarejestrowane sygnaly odkształceń poddano analizie uwzględniając stałą tensometryczną zastosowanych tensometrów ($k = 2,07$). Do analizy naprężeń w punktach pomiarowych przyjęto następujące wartości modułu sprężystości:

- na izolatorach kolumn dla porcelany $E = 124$ GPa,
- na ramie dla stali $E = 210$ GPa.

W wyniku analizy otrzymano charakterystyki dynamiczne amplitudy naprężeń w dziedzinie częstotliwości w zakresie $2,25 \div 35$ Hz dla poszczególnych punktów pomiarowych odłącznika.

3.4.3 Wyniki badań

3.4.3.1 Kierunek wymuszenia drgań poprzeczny Y, odłącznik zamknięty

Tabela 3.52 prezentuje zestawienie wyników analiz przyspieszeń w postaci częstotliwości rezonansowych, wartości powiększenia drgań oraz współczynników dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa				Powiększenie drgań	Współczynnik		Poziom zadany ogólny
	f_R	f_R	f_R	f_R		dobroci	tłumienia	amplituda
	Hz	Hz	Hz	Hz		Q	ξ	22Y
							%	m/s^2
Kolumna I 6Y	6,23				31,50	22,64	2,21	0,7
		8,47			3,35			
			17,51		3,18	50,03	1,00	
Kolumna II 10Y	6,23				32,65	22,98	2,18	
		8,89			2,62	10,65	4,69	
			17,27		2,79	37,71	1,33	
Tor prądowy 8Y	6,22				36,07	23,47	2,13	
				33,81	6,78	23,61	2,12	
Tor prądowy 8Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2							
Tor prądowy 9Y	6,23				35,26	22,98	2,18	
		8,61			2,50			
				33,73	2,79	26,51	1,89	
Tor prądowy 9Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2							
Rama 17Y	6,08				2,23	16,94	2,95	
Rama 17Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2							
Uziemnik 21Y	6,19				8,87	32,43	1,54	
			17,83		7,85	21,74	2,30	

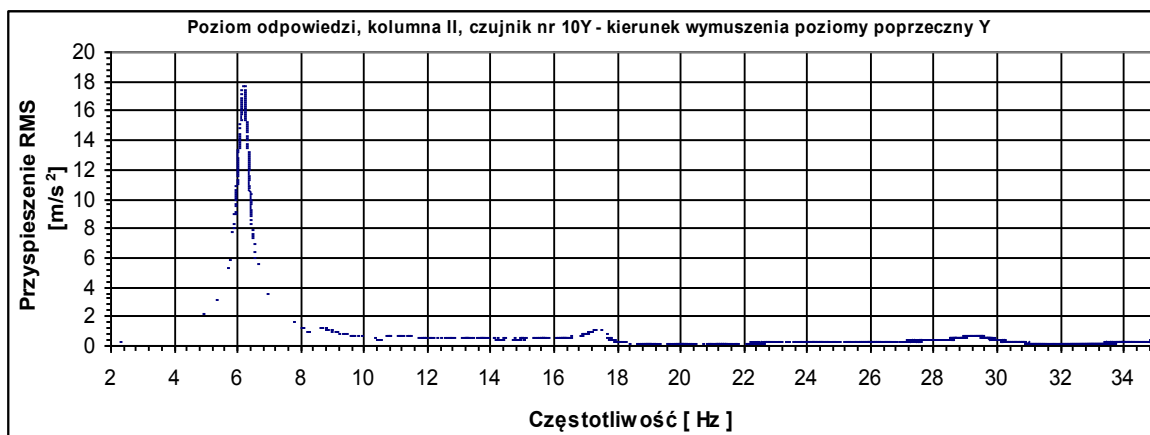
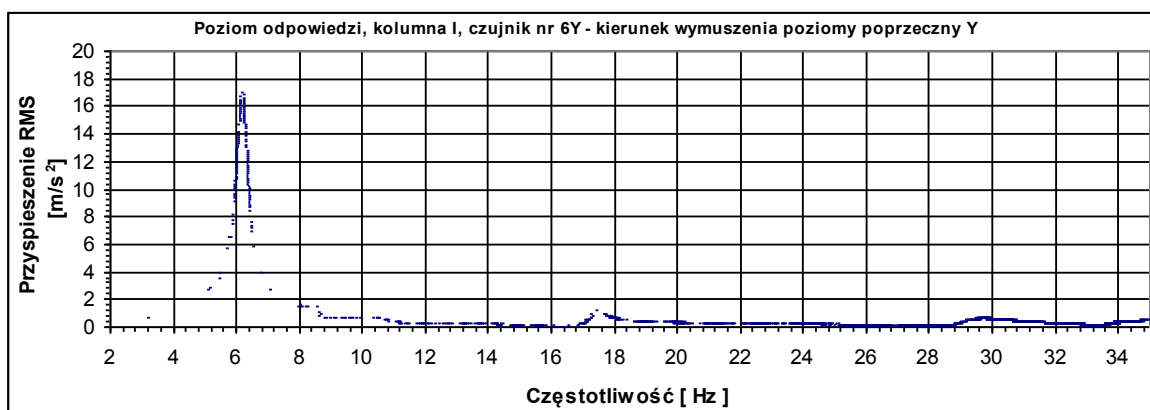
Tabela 3.52. Zestawienie wyników analiz przyspieszeń dla wymuszenia w kierunku poprzecznym Y dla odłącznika zamkniętego.

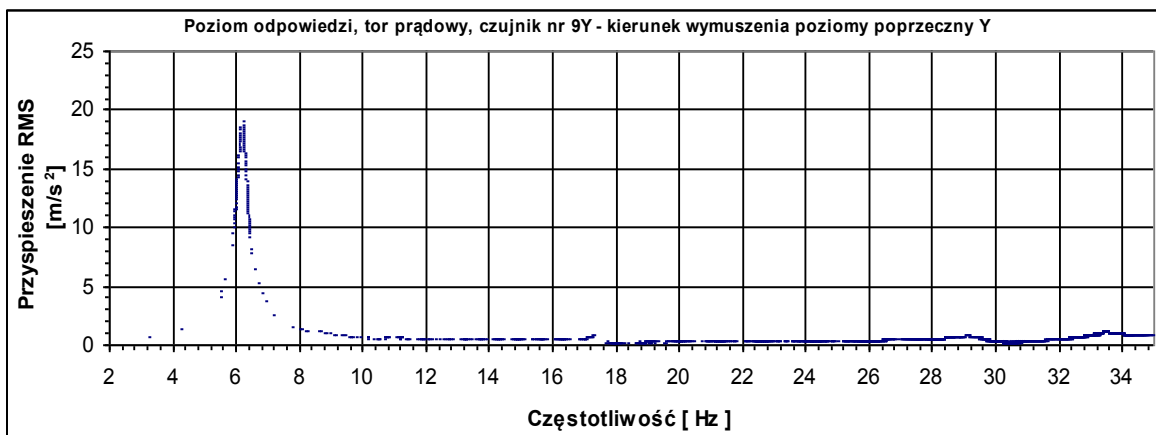
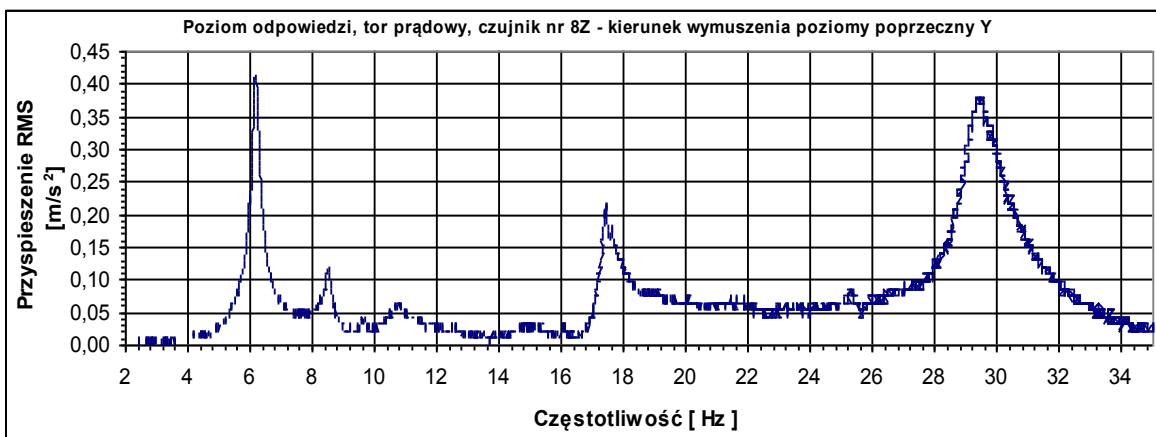
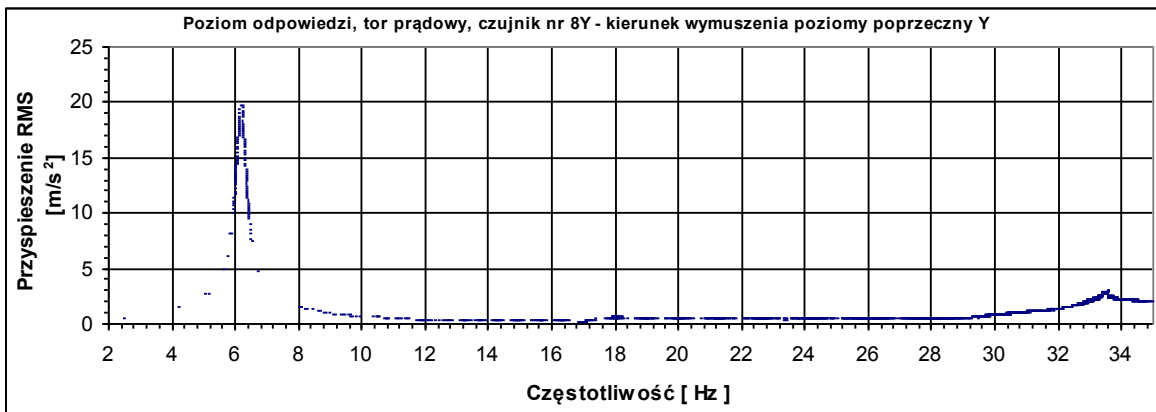
Tabela 3.53 prezentuje zestawienie wyników analiz naprężeń w postaci ekstremalnych wartości naprężeń dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych.

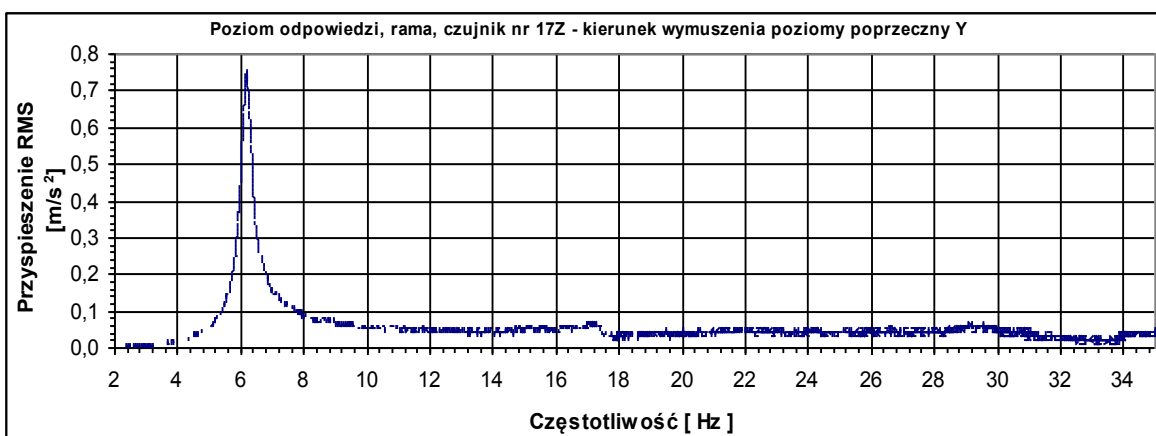
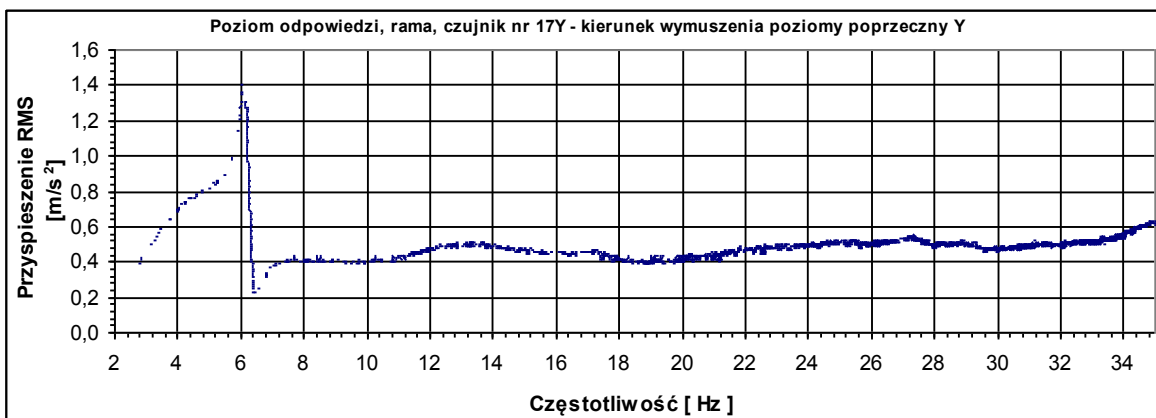
Punkt pomiarowy	Częstotliwość f_R	Naprężenia		Poziom zadany dla f_R
		Max	Min	RMS
	Hz	MPa	MPa	m/s^2
Kolumna I T1	6,15	1,93	-0,90	0,60
Kolumna I T2	6,15	9,18	-8,98	0,60
Kolumna II T3	6,13	9,90	9,90	0,62
Kolumna II T4	6,13	2,39	-1,19	0,62
Rama T5	6,16	13,30	-12,15	0,59
Rama T6	6,16	5,38	-2,94	0,59
Rama T7	6,16	7,37	-7,10	0,59

Tabela 3.53. Zestawienie wyników analiz naprężeń dla wymuszenia w kierunku poprzecznym Y dla odłącznika zamkniętego.

Wykresy charakterystyk dynamicznych w postaci przyspieszeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych 6, 10, 8, 9, 17 i 21 pokazano na Rys. 3.78.

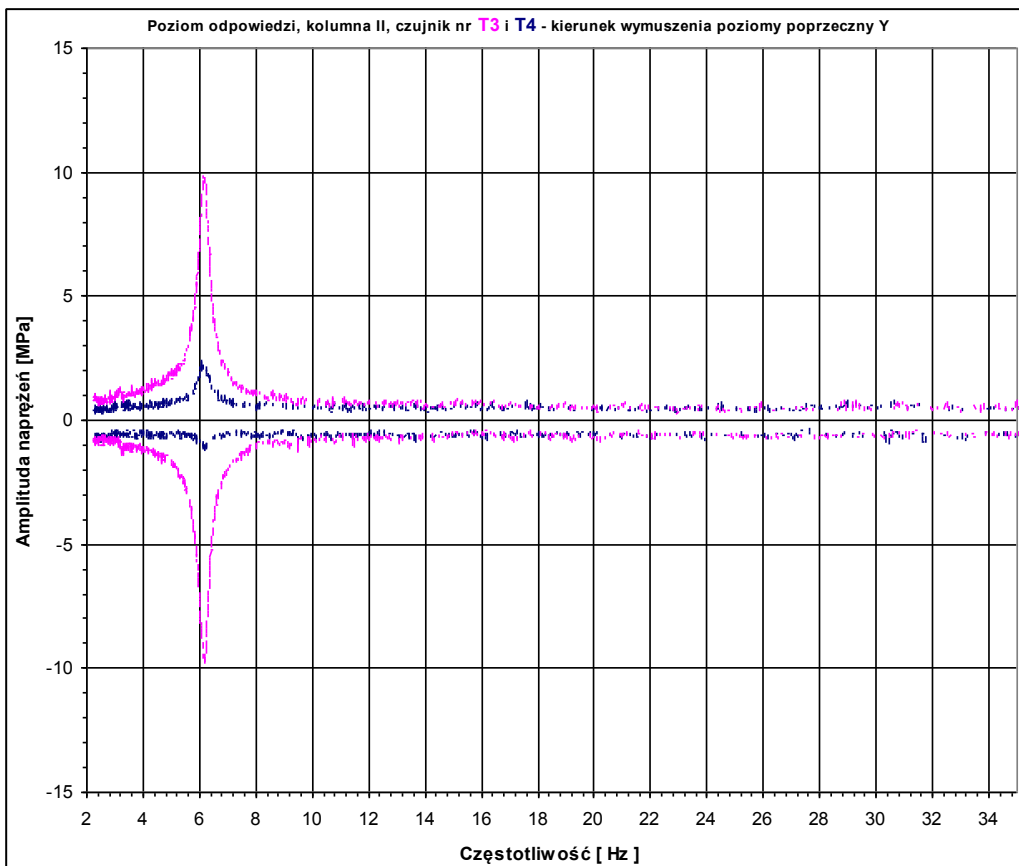
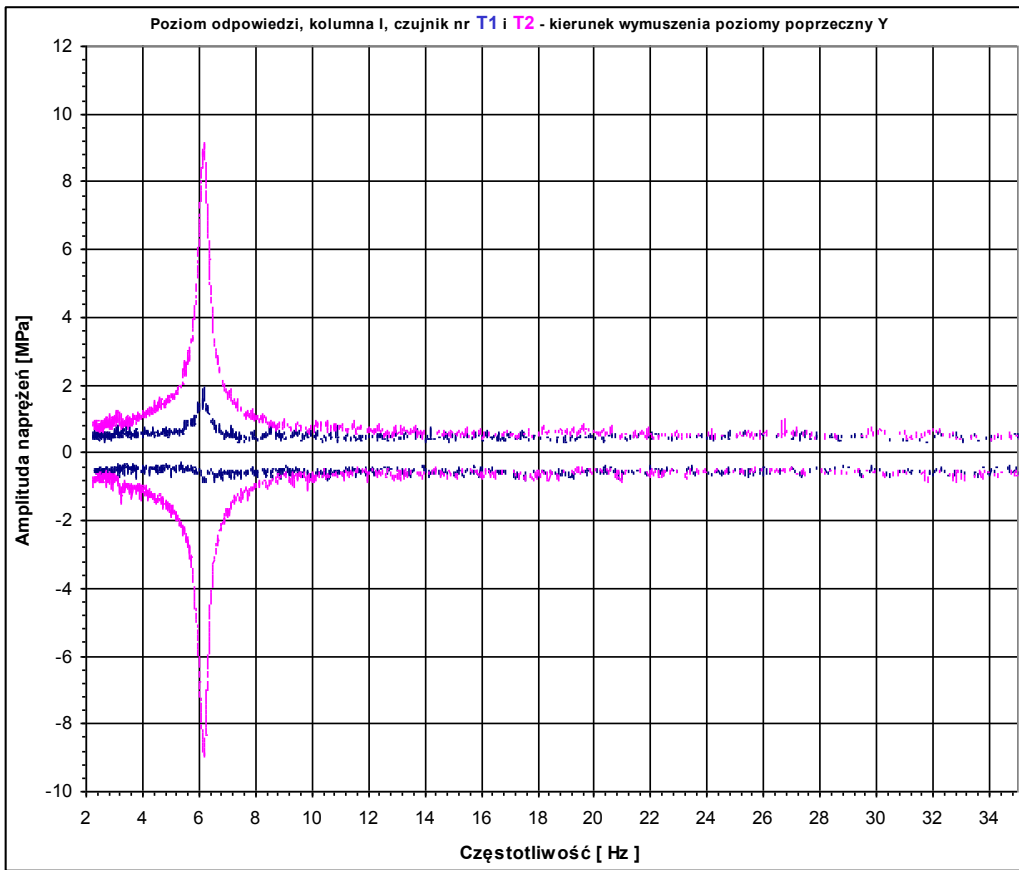


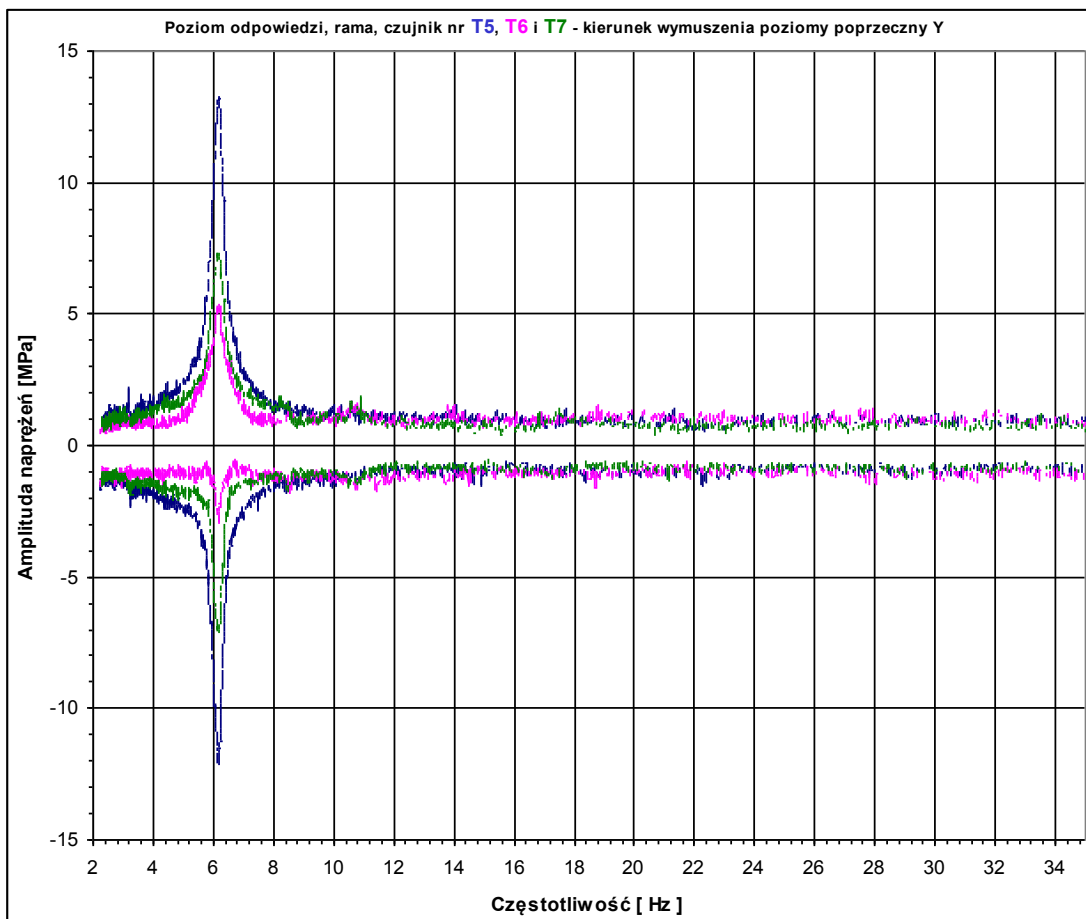




Rys. 3.78. Charakterystyki dynamiczne dla wymuszenia w kierunku Y dla odłącznika zamkniętego.

Wykresy naprężeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych T1, T2, T3, T4, T5, T6 oraz T7 pokazano na Rys. 3.79.





Rys. 3.79. Wykresy naprężeń dla wymuszenia w kierunku Y dla odłącznika zamkniętego.

3.4.3.2 Kierunek wymuszenia drgań wzdłużny X, odłącznik zamknięty

Tabela 3.54 prezentuje zestawienie wyników analiz przyspieszeń w postaci częstotliwości rezonansowych, wartości powiększenia drgań oraz współczynników dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa			Powiększenie drgań	Współczynnik		Poziom zadany ogólny
	f_R	f_R	f_R		dobroci	tłumienia	amplituda
	Hz	Hz	Hz		Q	ξ	22X
						%	m/s^2
Kolumna I 6X	8,49			10,03	13,52	3,70	2,0
		13,01		2,34			
Kolumna II 10X	8,49			10,11	13,99	3,57	
		13,01		2,28			
Tor prądowy 8X	8,48			9,91	13,55	3,69	
		13,04		2,24			
Tor prądowy 8Z	8,55			4,69	13,22	3,78	
Tor prądowy 9X	8,49			10,07	13,99	3,57	
		13,01		2,23			
Tor prądowy 9Z	8,56			2,76	14,12	3,54	
Rama 17X	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						
Rama 17Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						
Uziemnik 21Z			16,48	2,37	72,59	0,69	

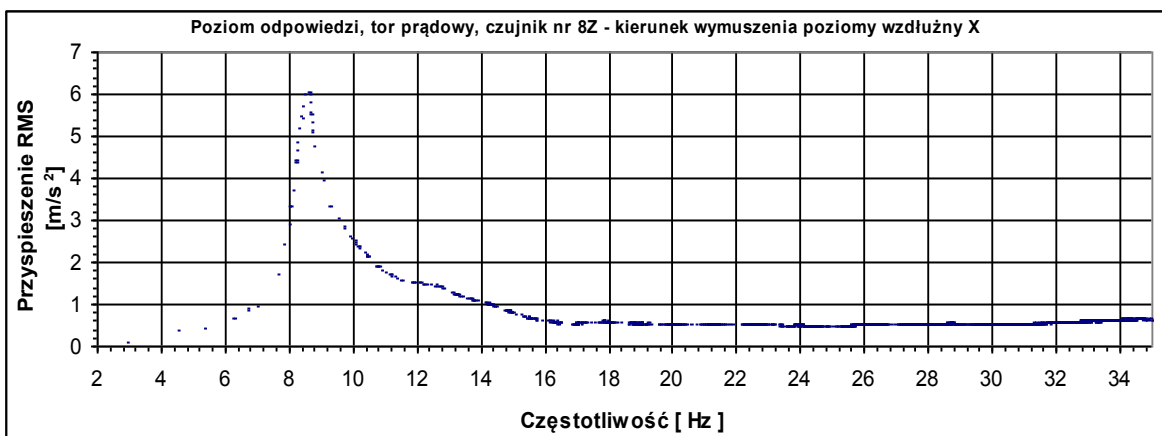
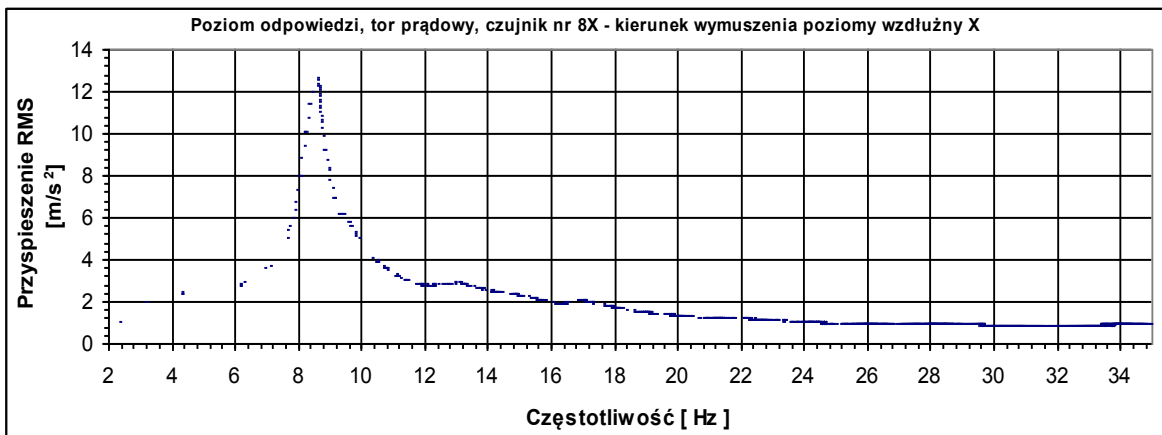
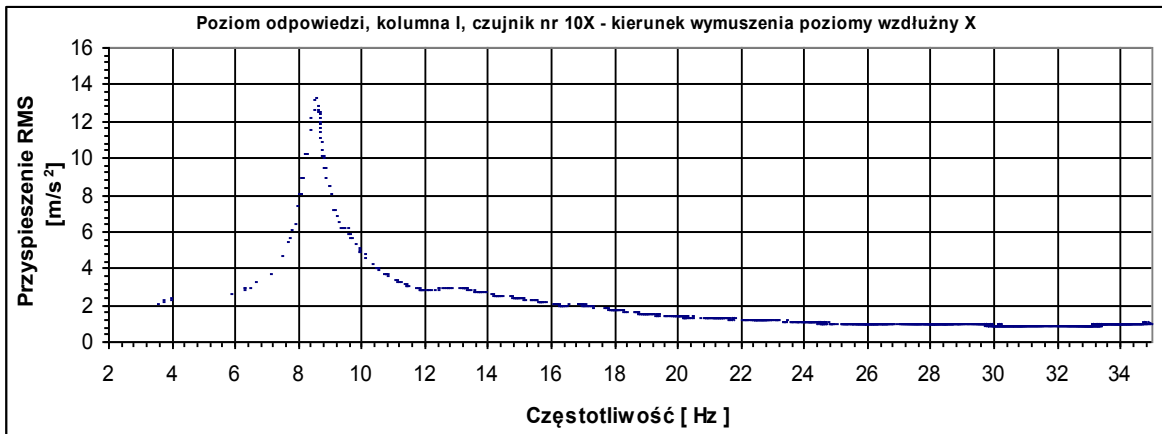
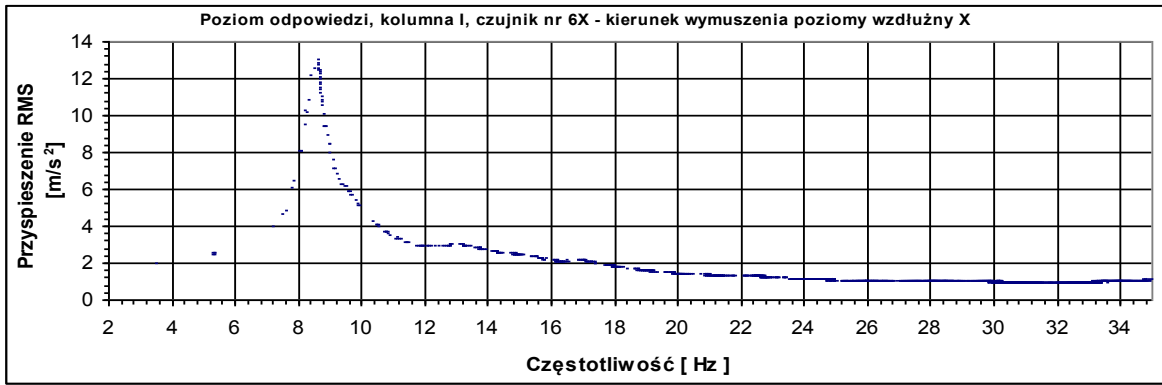
Tabela 3.54. Zestawienie wyników analiz przyspieszeń dla wymuszenia w kierunku poziomym X dla odłącznika zamkniętego.

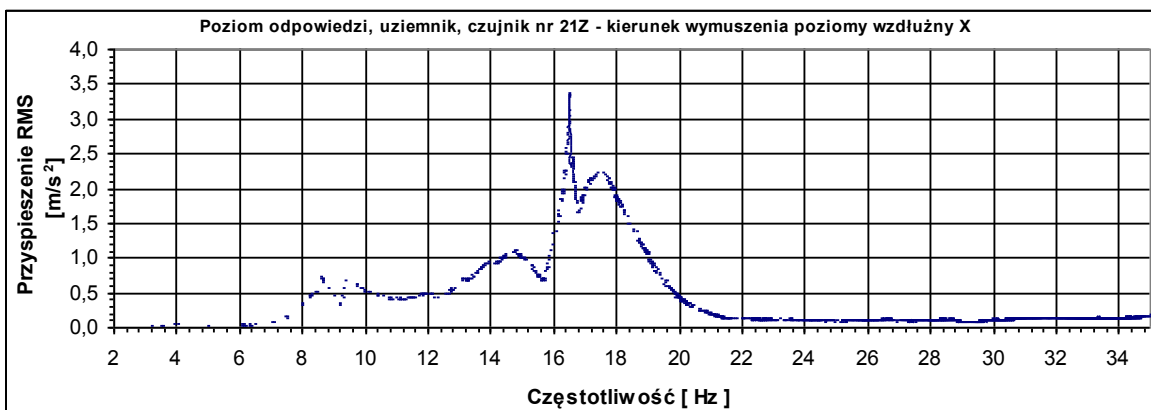
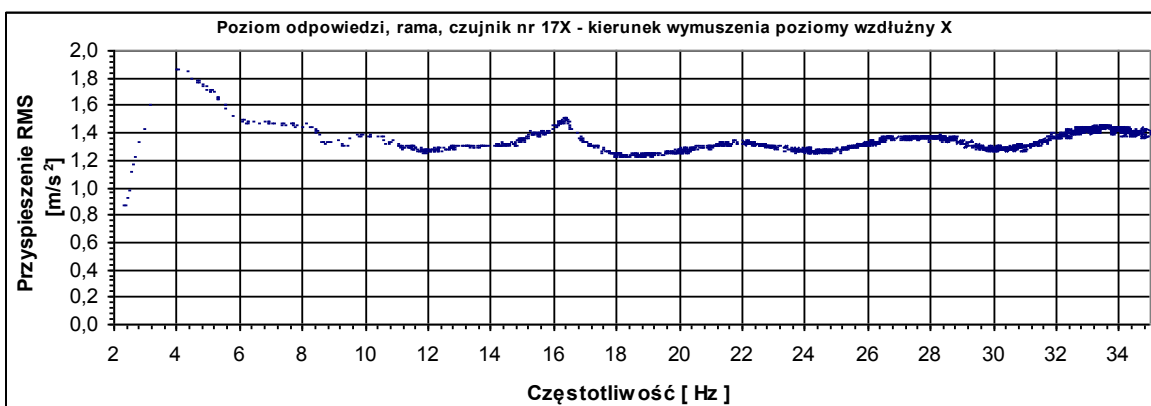
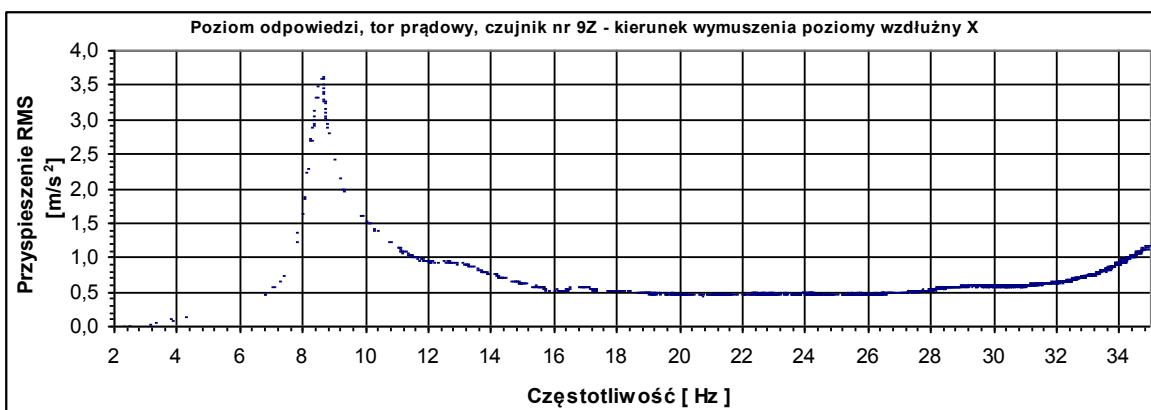
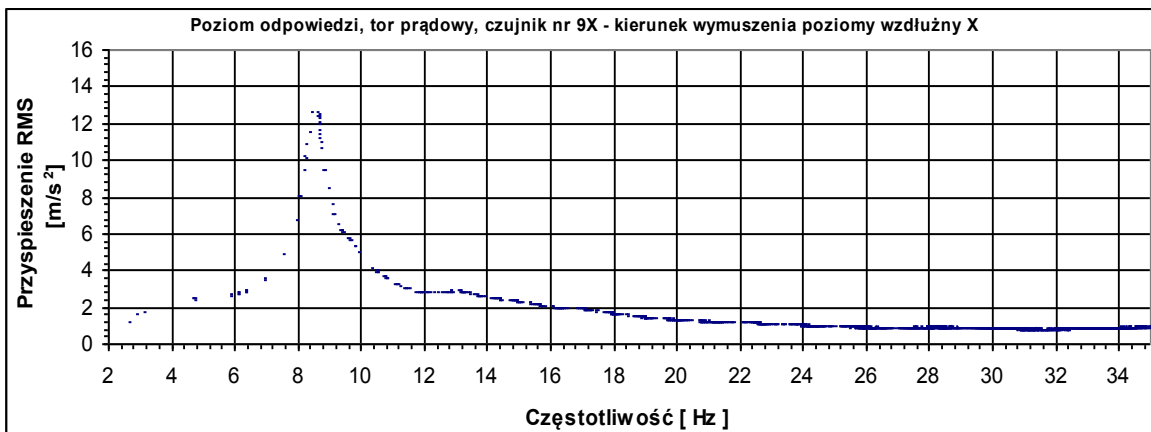
Tabela 3.55 prezentuje zestawienie wyników analiz naprężeń w postaci ekstremalnych wartości naprężeń dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość			Naprężenia	
	f_R	f_R	f_R	Max	Min
	Hz	Hz	Hz	MPa	MPa
Kolumna I T1		8,48		6,62	-6,63
Kolumna I T2	6,43			1,16	-1,29
Kolumna II T3			9,29	1,70	-1,77
Kolumna II T4		8,45		7,08	-7,24
Rama T5		8,45		6,84	-6,68
Rama T6		8,45		21,71	-21,23
Rama T7		8,45		12,31	-13,24

Tabela 3.55. Zestawienie wyników analiz naprężeń dla wymuszenia w kierunku poziomym X dla odłącznika zamkniętego.

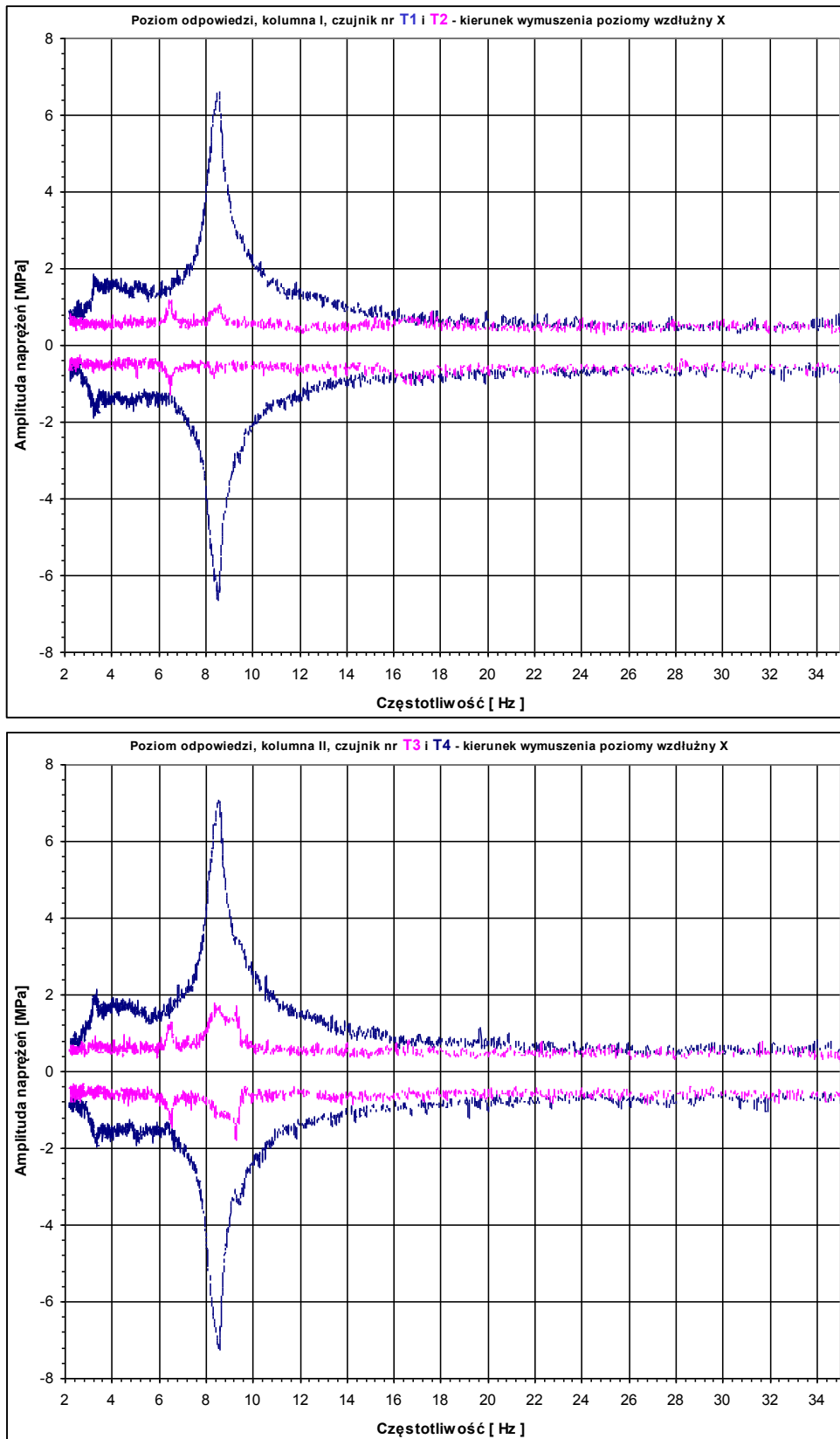
Wykresy charakterystyk dynamicznych w postaci przyspieszeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych 6, 10, 8, 9, 17 i 21 pokazano na Rys. 3.80.

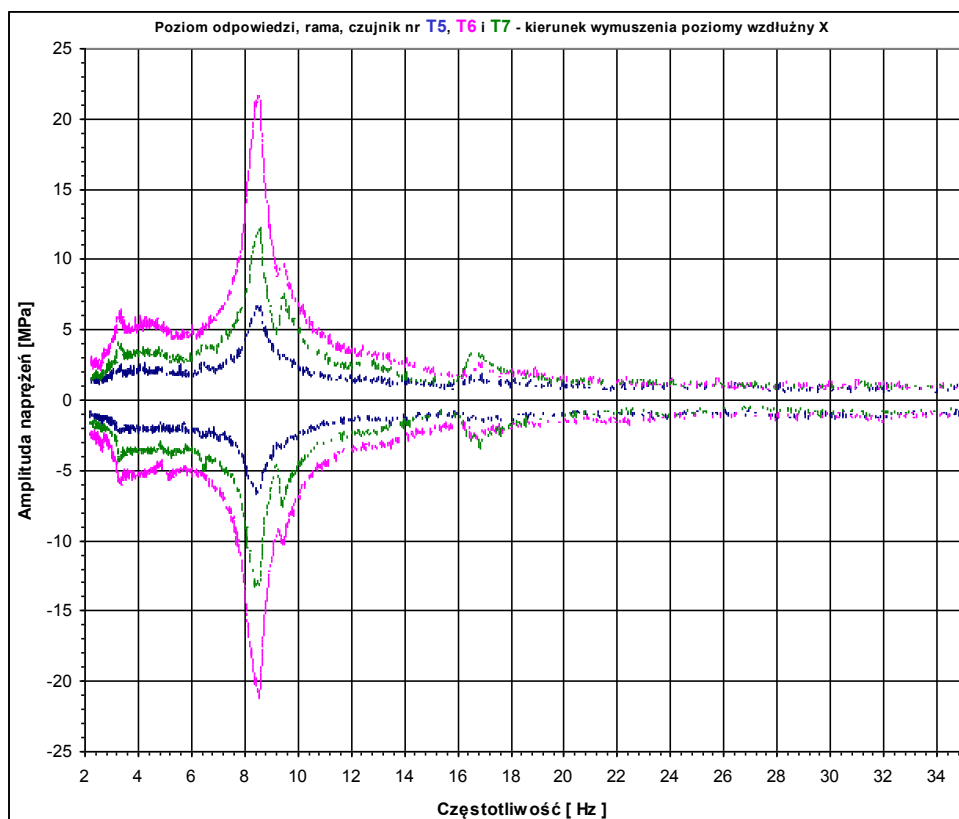




Rys. 3.80. Charakterystyki dynamiczne dla wymuszenia w kierunku X dla odłącznika zamkniętego.

Wykresy naprężeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych T1, T2, T3, T4, T5, T6 oraz T7 pokazano na Rys. 3.81.





Rys. 3.81. Wykresy naprężeń dla wymuszenia w kierunku X dla odłącznika zamkniętego.

3.4.3.3 Kierunek wymuszenia drgań pionowy Z, odłącznik zamknięty

Tabela 3.56 prezentuje zestawienie wyników analiz przyspieszeń w postaci częstotliwości rezonansowych, wartości powiększenia drgań oraz współczynników dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa					Powiększenie drgań	Współczynnik		Poziom zadany ogólny amplituda	
	f_R	f_R	f_R	f_R	f_R		dobroci	tłumienia		
	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz		Q	ξ		
								%	22Z	
									m/s ²	
Kolumna I 6Z					26,60	3,87	24,41	2,05	2,0	
Kolumna II 10Z				25,72		2,38	20,58	2,43		
Tor prądowy 8Z					26,82	3,47	20,16	2,48		
Tor prądowy 8X	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Tor prądowy 9Z				25,64		2,31	15,94	3,14		
Tor prądowy 9X	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Rama 17Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Rama 17Y	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Uziemnik 21Z	10,94					3,09	5,80	8,62		
		14,88				2,33	18,14	2,76		
			18,33			2,56	7,85	6,37		

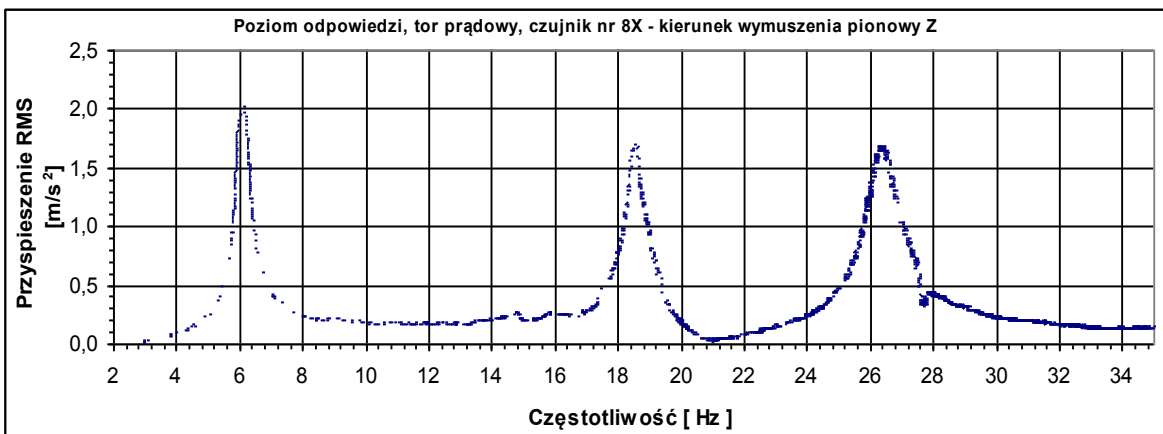
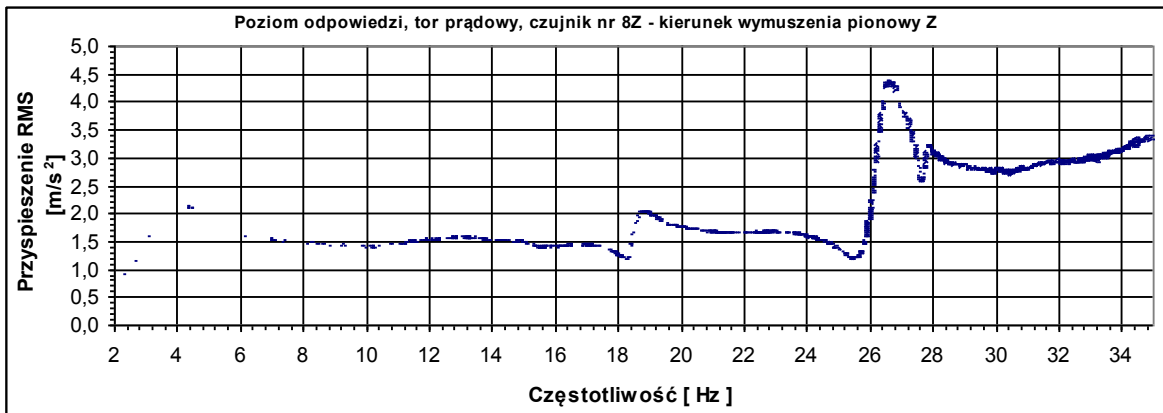
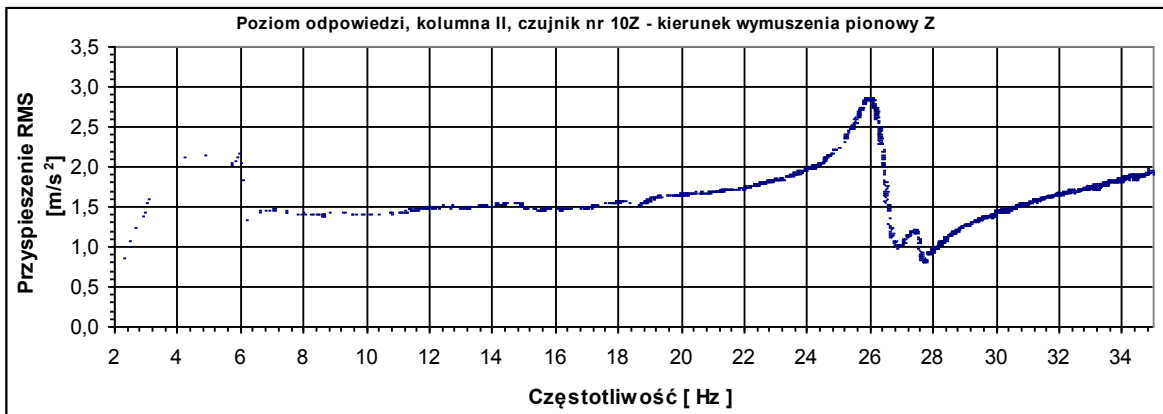
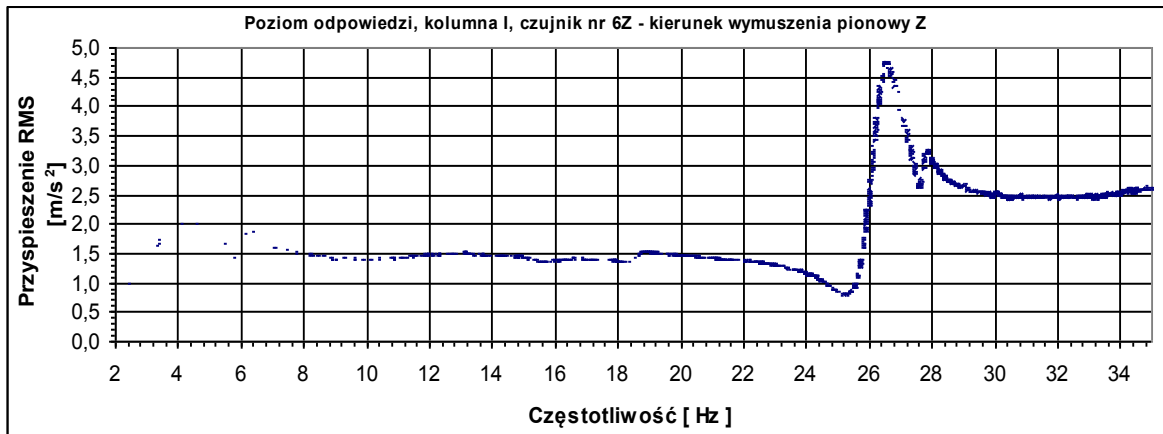
Tabela 3.56. Zestawienie wyników analiz przyspieszeń dla wymuszenia w kierunku pionowym Z dla odłącznika zamkniętego.

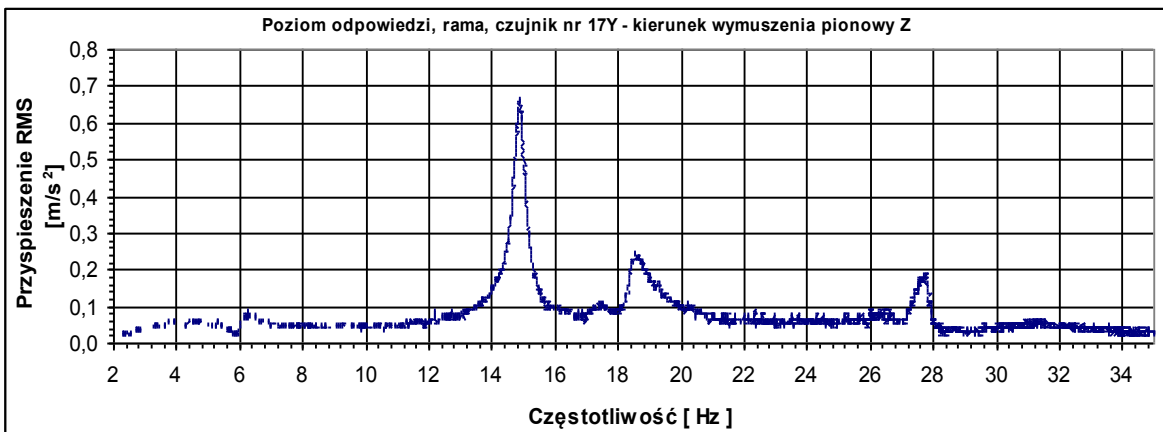
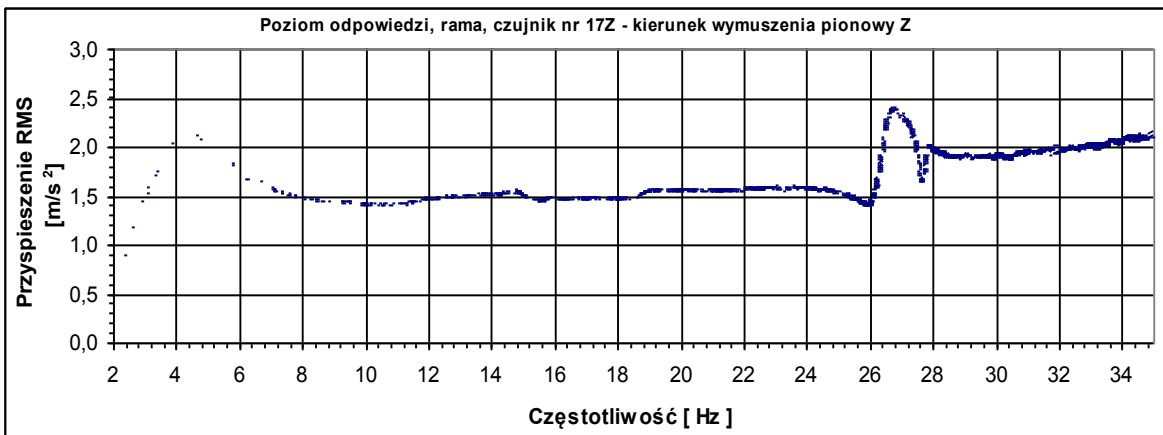
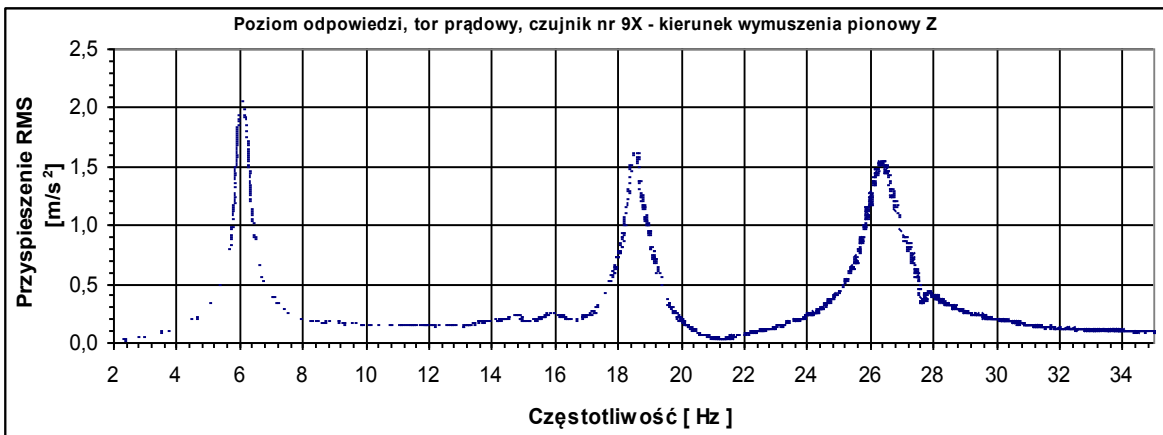
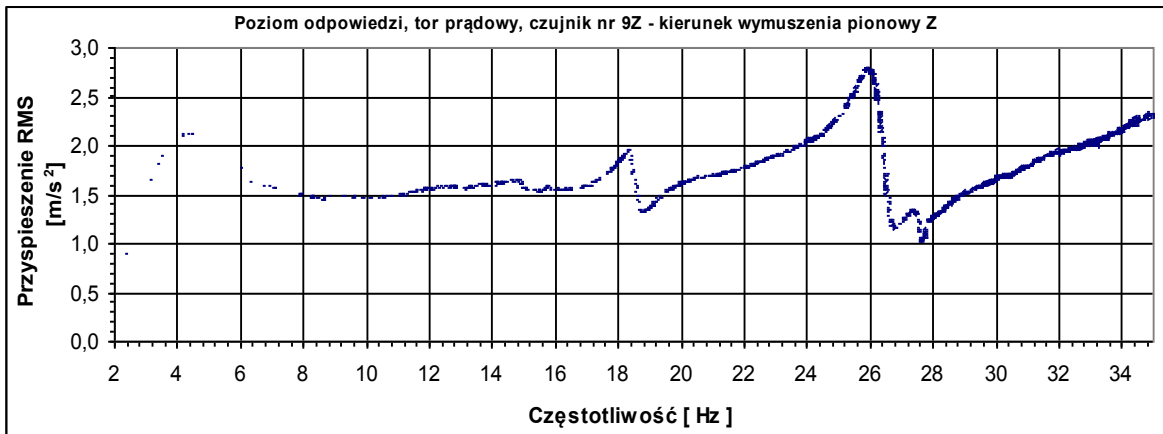
Tabela 3.57 prezentuje zestawienie wyników analiz naprężeń w postaci ekstremalnych wartości naprężeń dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych.

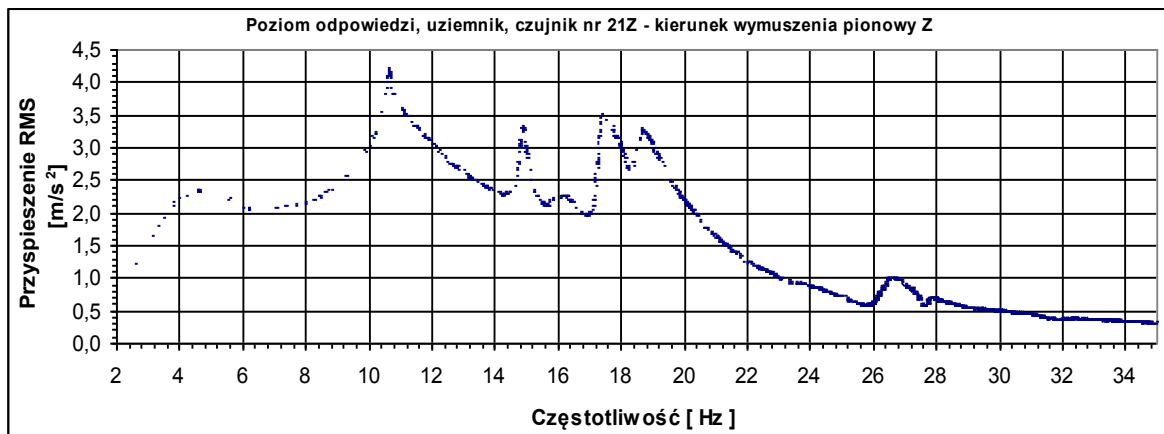
Punkt pomiarowy	Częstotliwość		Naprężenia		Poziom zadany dla f_R
	f_R	f_R	Max	Min	RMS
	Hz	Hz	MPa	MPa	m/s ²
Kolumna I T1		6,02	1,08	-1,12	1,75
Kolumna I T2		6,02	0,74	-0,75	1,75
Kolumna II T3	5,98		0,70	-0,72	1,78
Kolumna II T4	5,98		1,14	-1,29	1,78
Rama T5	5,98		1,76	-1,79	1,78
Rama T6	5,98		3,91	-3,37	1,78
Rama T7	5,98		2,18	-2,20	1,78

Tabela 3.57 Zestawienie wyników analiz naprężeń dla wymuszenia w kierunku pionowym Z dla odłącznika zamkniętego.

Wykresy charakterystyk dynamicznych w postaci przyspieszeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych 6, 10, 8, 9, 17 i 21 pokazano na Rys. 3.82.

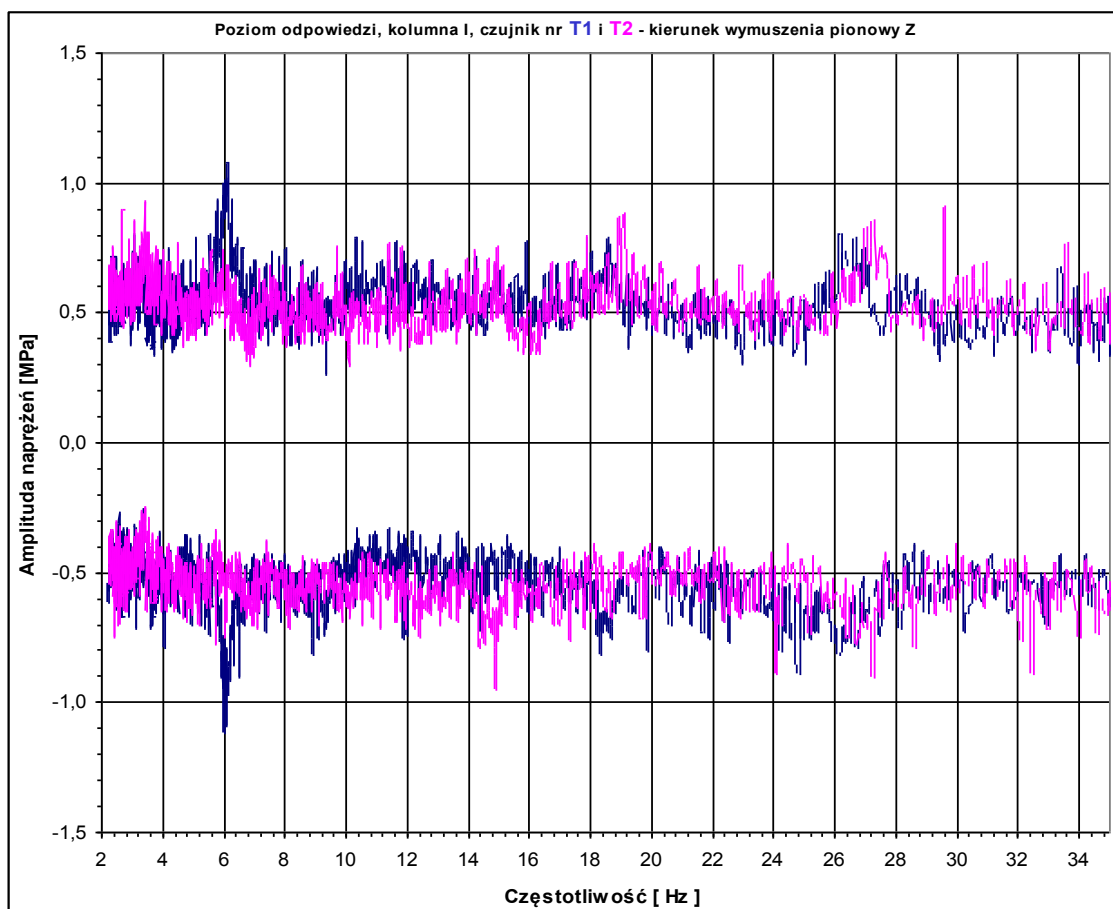


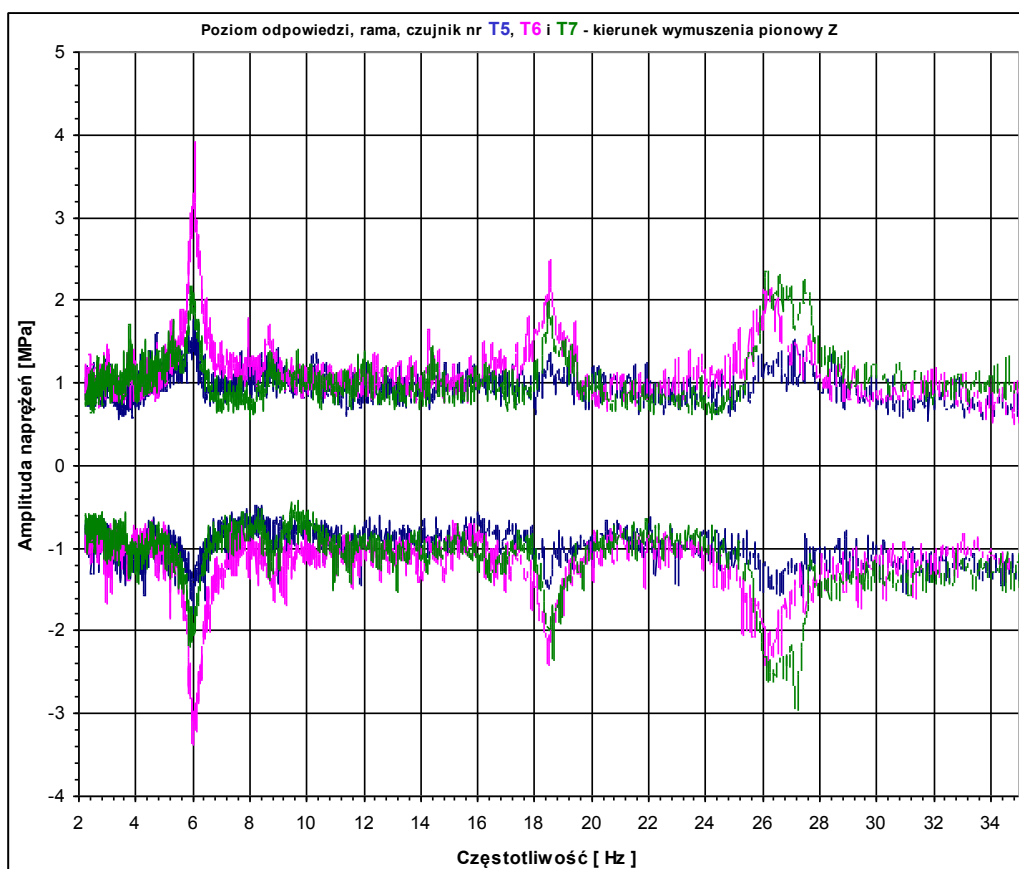
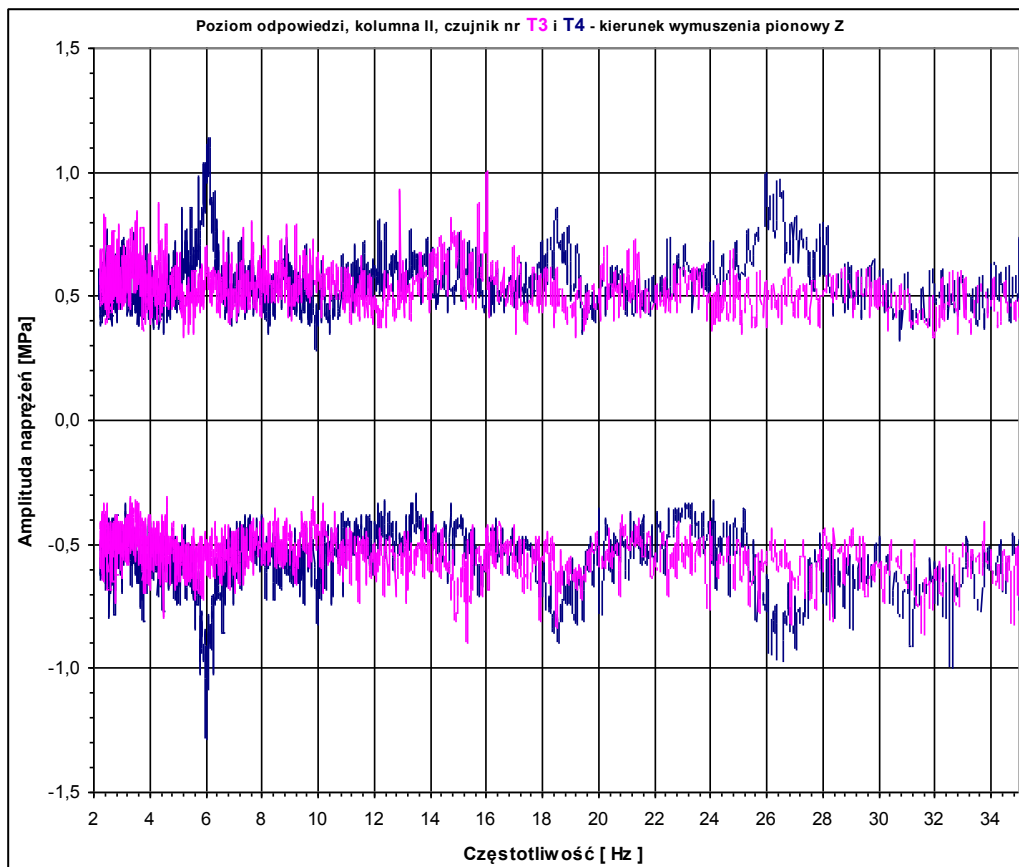




Rys. 3.82. Charakterystyki dynamiczne dla wymuszenia w kierunku Z dla odłącznika zamkniętego.

Wykresy naprężeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych T1, T2, T3, T4, T5, T6 oraz T7 pokazano na Rys. 3.83.





Rys. 3.83. Wykresy naprężeń dla wymuszenia w kierunku Z dla odłącznika zamkniętego.

3.4.3.4 Kierunek wymuszenia drgań poprzeczny Y, odłącznik otwarty

Tabela 3.58 prezentuje zestawienie wyników analiz przyspieszeń w postaci częstotliwości rezonansowych, wartości powiększenia drgań oraz współczynników dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa			Powiększenie drgań	Współczynnik		Poziom zadany ogólny amplituda
	f_R	f_R	f_R		dobroci	tłumienia	
	Hz	Hz	Hz		Q	ξ %	22Y m/s ²
Kolumna I 6Y		6,22		44,80	27,53	1,82	0,7
			8,17	3,21	11,29	4,43	
Kolumna II 10Y	5,95			17,37			
		6,27		24,52	29,43	1,70	
Tor prądowy 8Y		6,22		44,23	28,17	1,78	
			8,14	3,10	12,29	4,07	
Tor prądowy 8Z		6,23		21,02	28,32	1,77	
Tor prądowy 9Y	5,95			17,24			
		6,27		24,32	29,43	1,70	
Tor prądowy 9Z	5,95			4,76			
		6,27		7,51	28,64	1,75	
Rama 17Y		6,06		2,13	12,44	4,02	
Rama 17Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						
Uziemnik 20Y	5,92			9,60	26,93	1,86	
		6,27		11,57	29,43	1,70	

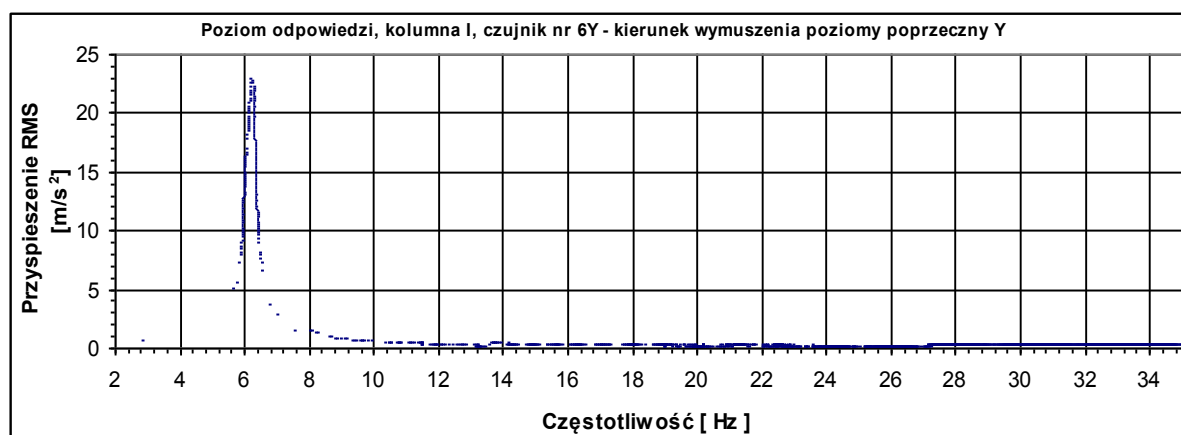
Tabela 3.58. Zestawienie wyników analiz przyspieszeń dla wymuszenia w kierunku poprzecznym Y dla odłącznika otwartego.

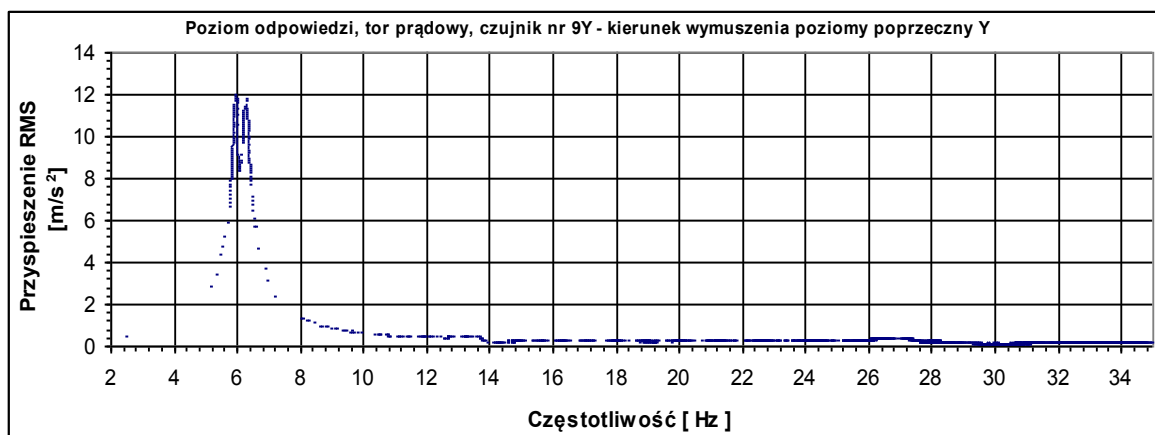
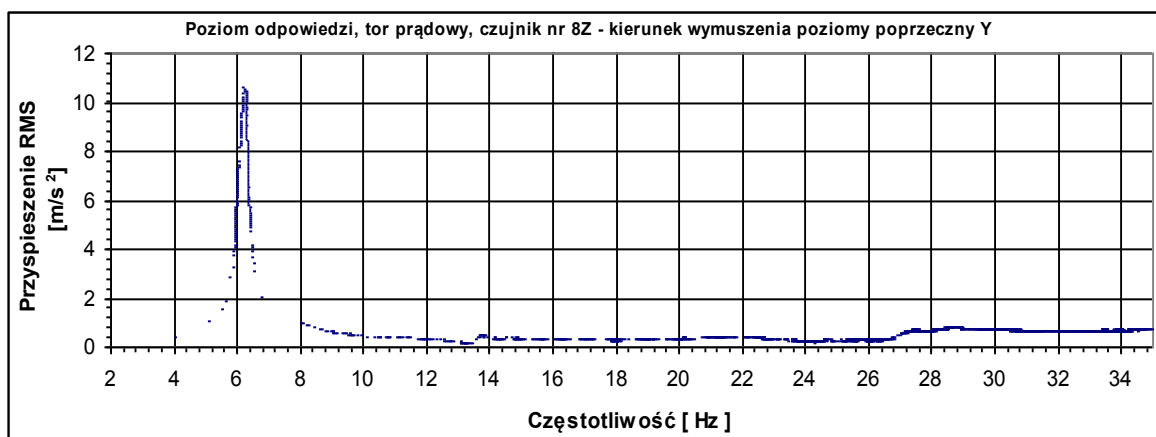
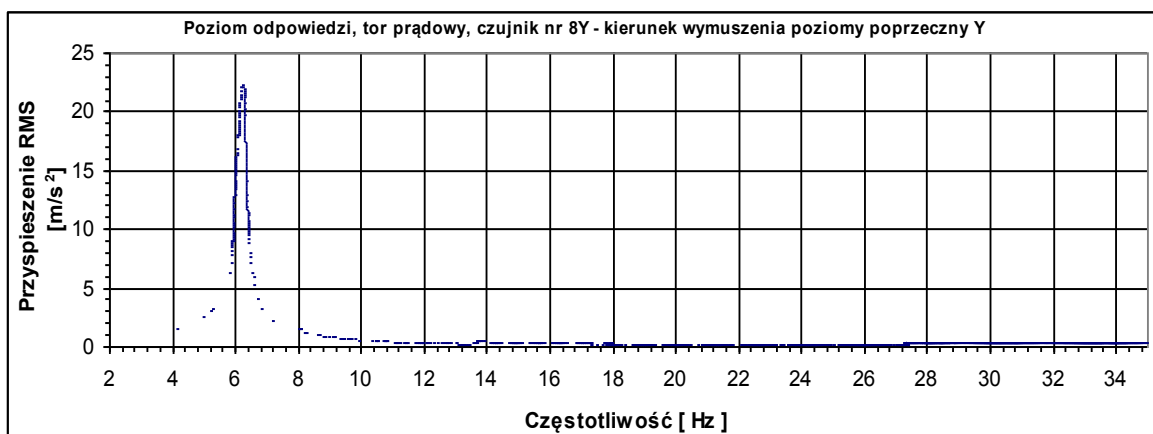
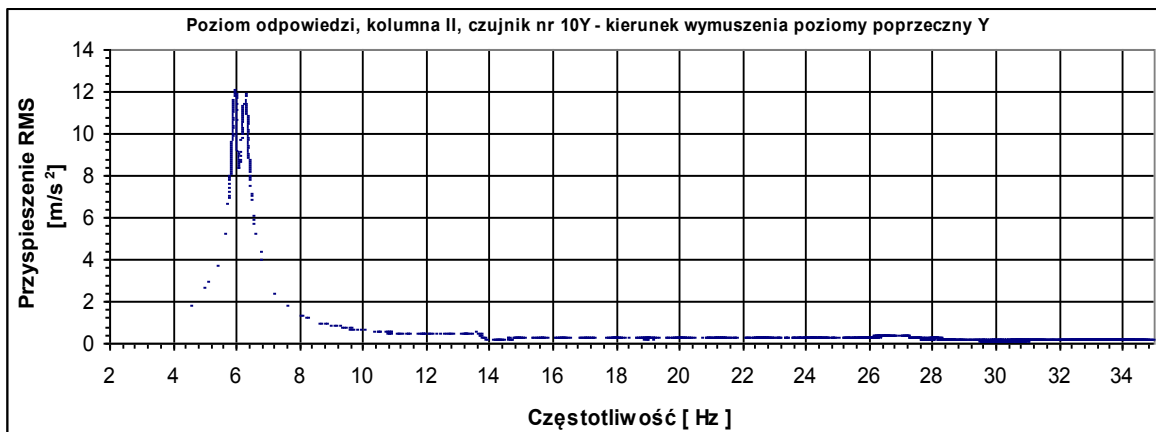
Tabela 3.59 prezentuje zestawienie wyników analiz naprężeń w postaci ekstremalnych wartości naprężeń dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych.

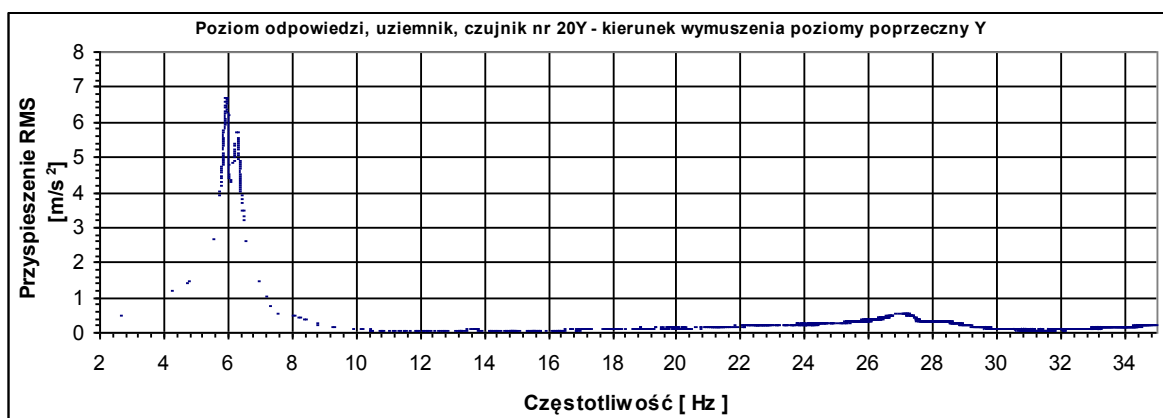
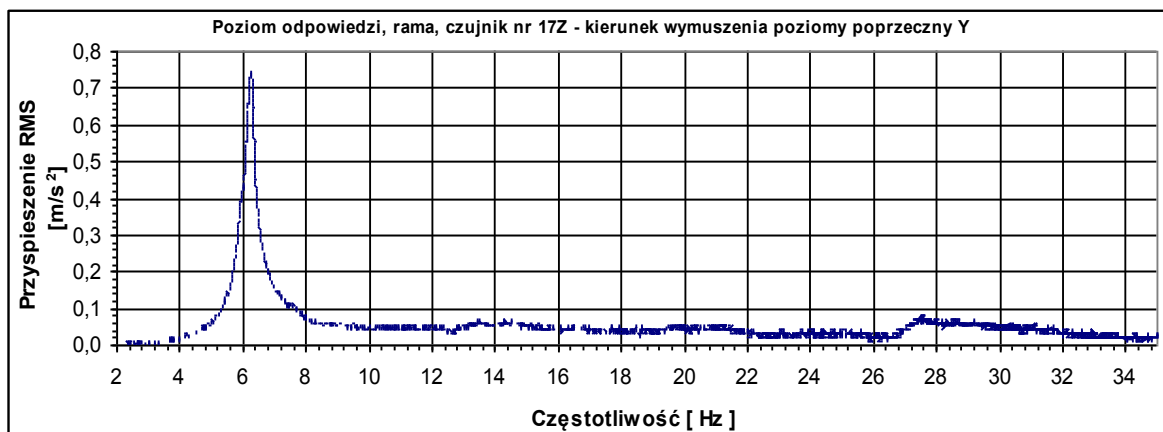
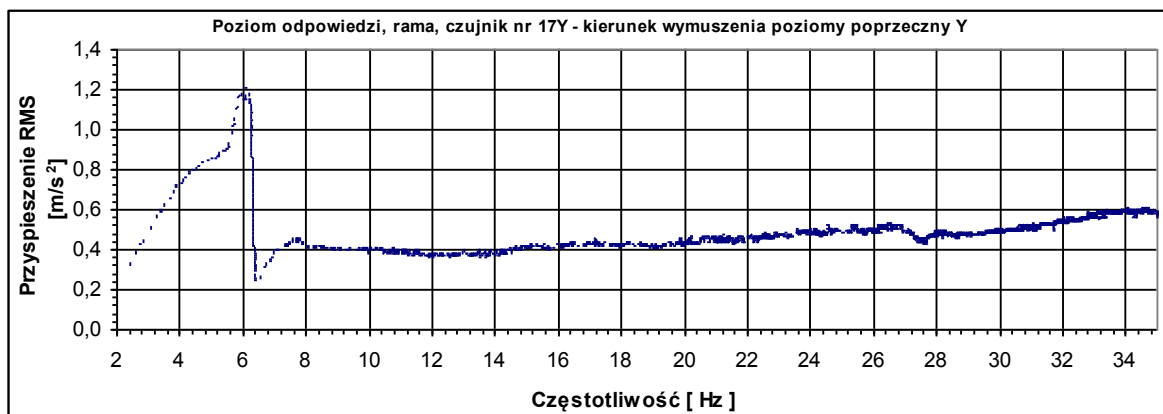
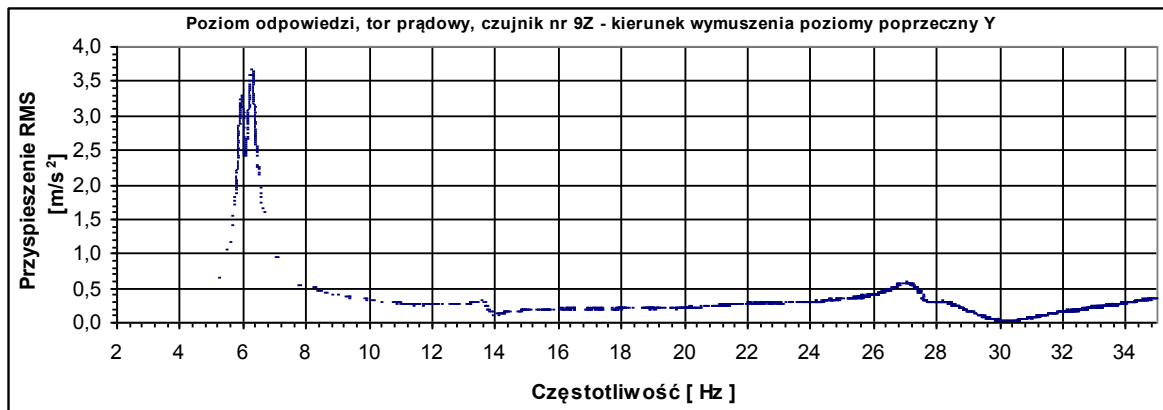
Punkt pomiarowy	Częstotliwość			Naprężenia		Poziom zadany dla f_R
	f_R	f_R	f_R	Max	Min	RMS
	Hz	Hz	Hz	MPa	MPa	m/s^2
Kolumna I T1		6,19		12,30	-12,01	0,56
			7,79	1,33	-1,18	0,52
Kolumna I T2		6,19		2,00	-0,49	0,56
			7,79	1,63	-1,58	0,52
Kolumna II T3	5,82			1,49	-1,08	0,74
		6,18		1,81	-1,35	0,57
Kolumna II T4	5,82			6,70	-7,02	0,74
		6,18		6,03	-6,92	0,57
Rama T5		6,12		21,59	-15,14	0,62
			7,81	5,50	0,53	0,52
Rama T6		6,12		5,73	-5,32	0,62
			7,81	4,96	-4,99	0,52
Rama T7		6,12		18,92	-20,75	0,62
			7,81	3,92	-4,30	0,52

Tabela 3.59. Zestawienie wyników analiz naprężeń dla wymuszenia w kierunku poprzecznym Y dla odłącznika otwartego.

Wykresy charakterystyk dynamicznych w postaci przyspieszeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych 6, 10, 8, 9, 17 i 20 pokazano na Rys. 3.84.

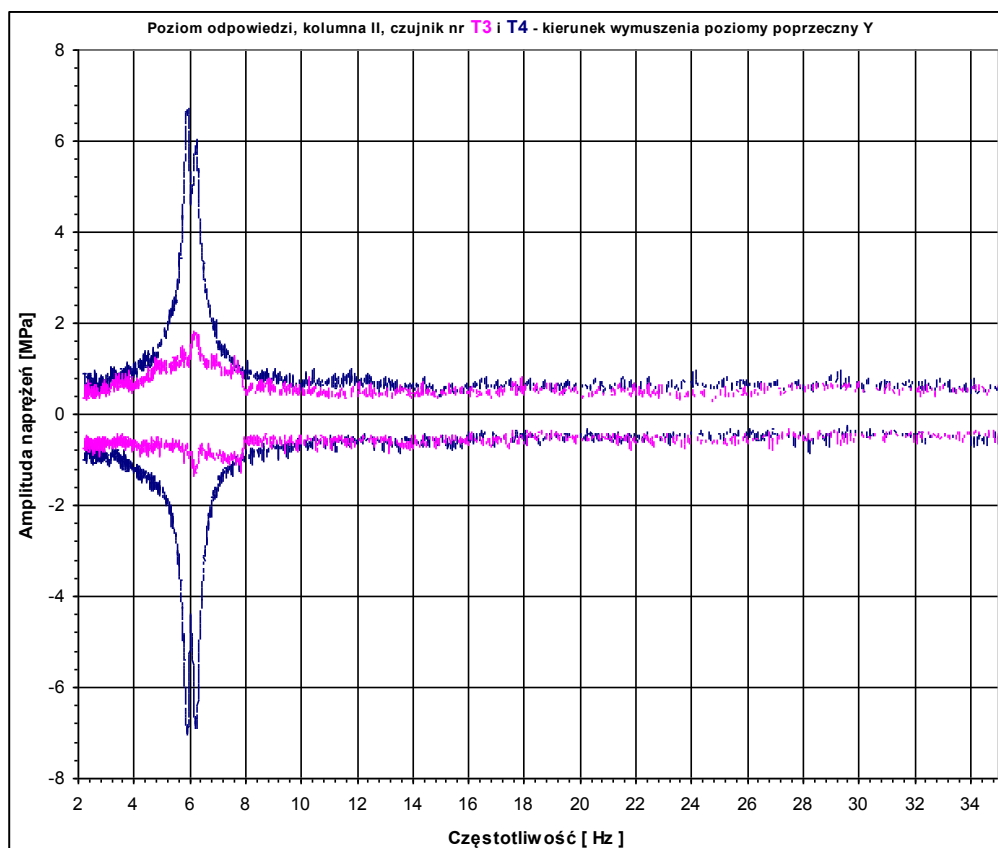
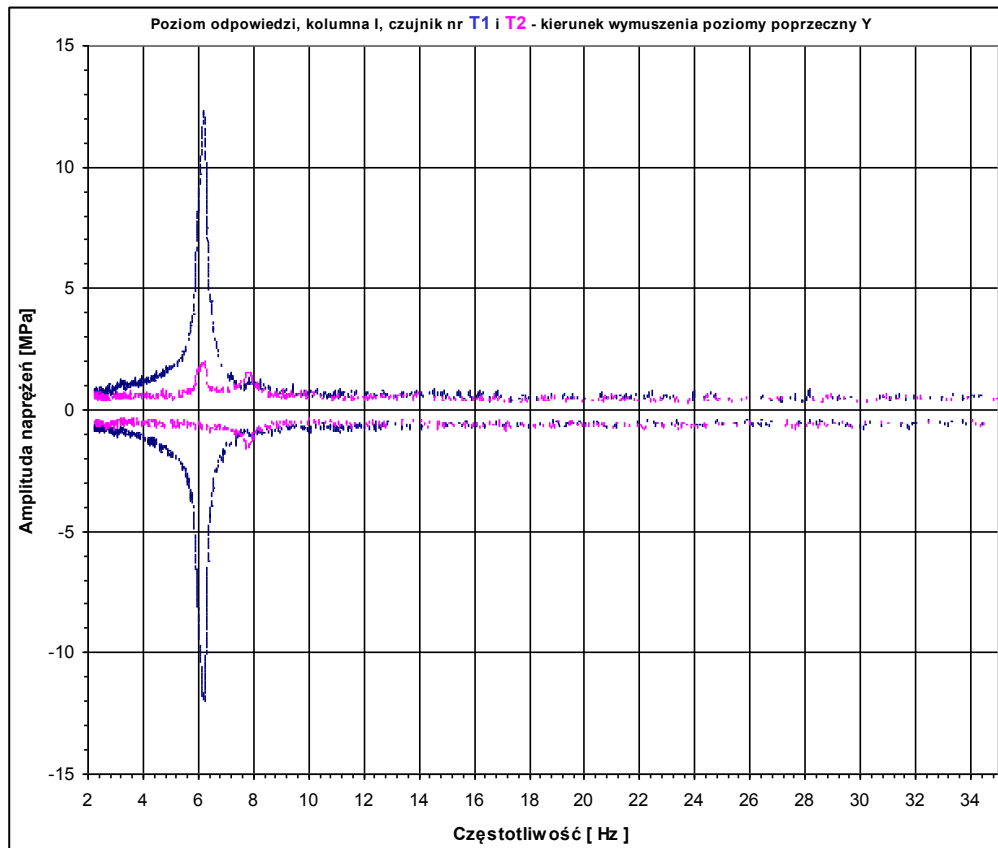


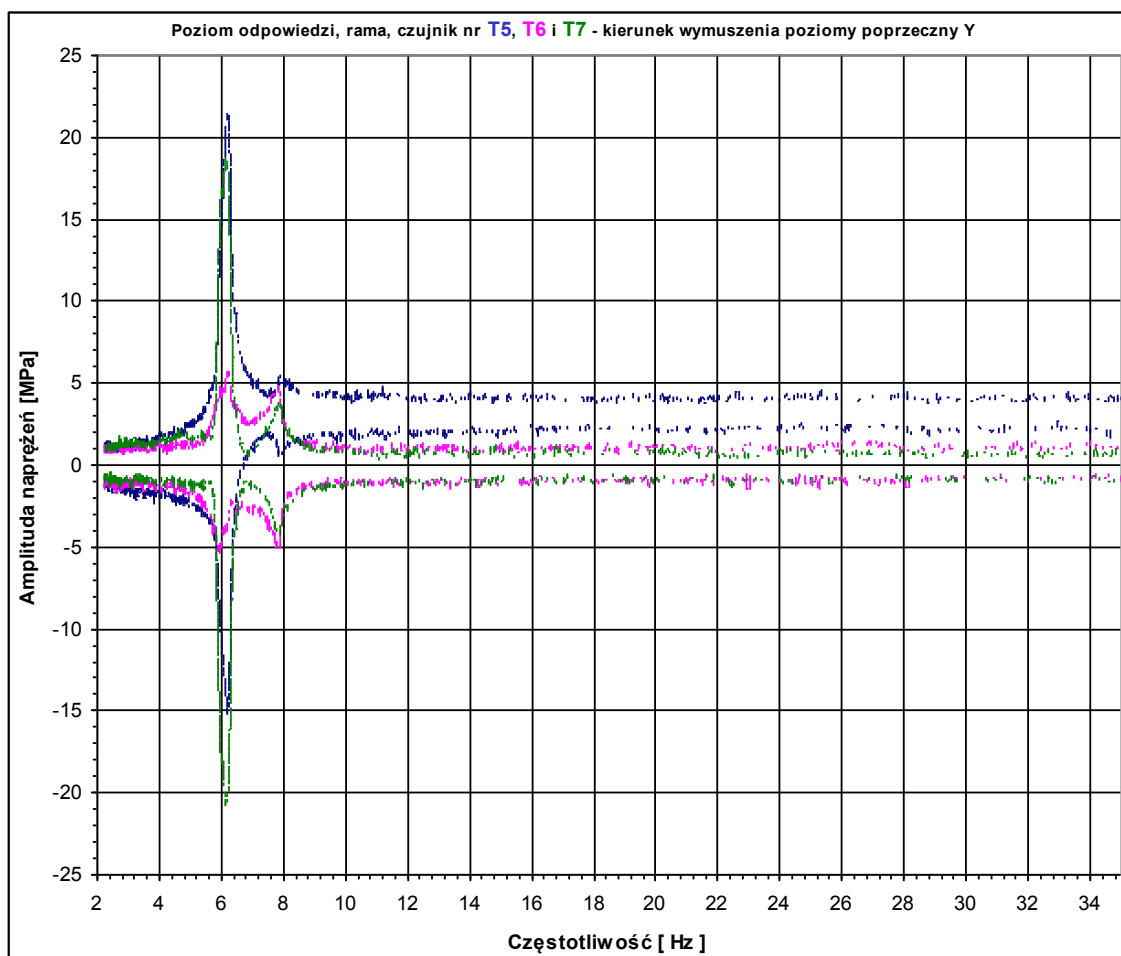




Rys. 3.84. Charakterystyki dynamiczne dla wymuszenia w kierunku Y dla odłącznika otwartego.

Wykresy naprężeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych T1, T2, T3, T4, T5, T6 oraz T7 pokazano na Rys. 3.85.





Rys. 3.85. Wykresy naprężeń dla wymuszenia w kierunku Y dla odłącznika otwartego.

3.4.3.5 Kierunek wymuszenia drgań wzłużny X, odłącznik otwarty

Tabela 3.60 prezentuje zestawienie wyników analiz przyspieszeń w postaci częstotliwości rezonansowych, wartości powiększenia drgań oraz współczynników dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa					Powiększenie drgań	Współczynnik		Poziom	
	f_R	f_R	f_R	f_R	f_R		dobroci	tłumienia	zadany	
	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz		Q	ξ	ogólny	
									amplituda	
									22X	
									m/s ²	
Kolumna I 6X		8,41				31,09	22,50	2,22	0,7	
					19,74	2,53	19,64	2,55		
Kolumna II 10X	7,09					3,32				
		8,32				14,24	27,20	1,84		
			9,57			6,93	12,62	3,96		
				14,05		3,24	15,62	3,20		
Tor prądowy 8X		8,41				41,45	22,50	2,22		
					19,36	10,81	20,09	2,49		
Tor prądowy 8Z				13,73		4,62	51,04	0,98		
Tor prądowy 9X	7,09					2,93				
		8,32				13,03	27,20	1,84		
			9,5			6,93	12,83	3,90		
			6		19,58	3,91	22,25	2,25		
Tor prądowy 9Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Rama 17X	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Rama 17Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2									
Uziemnik 20X	7,09					2,05				
		8,31				6,71	24,80	2,02		
			9,44			3,39	14,57	3,43		

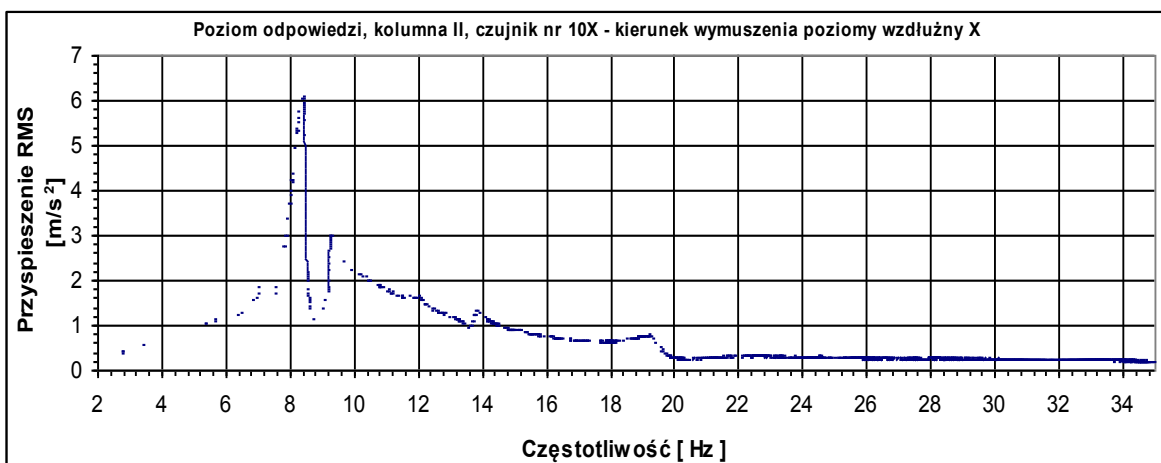
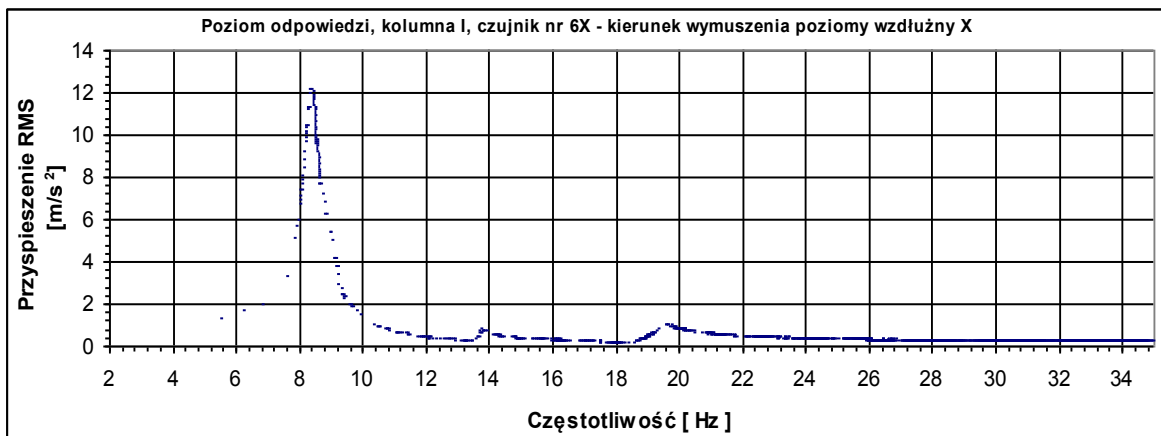
Tabela 3.60. Zestawienie wyników analiz przyspieszeń dla wymuszenia w kierunku poziomym X dla odłącznika otwartego.

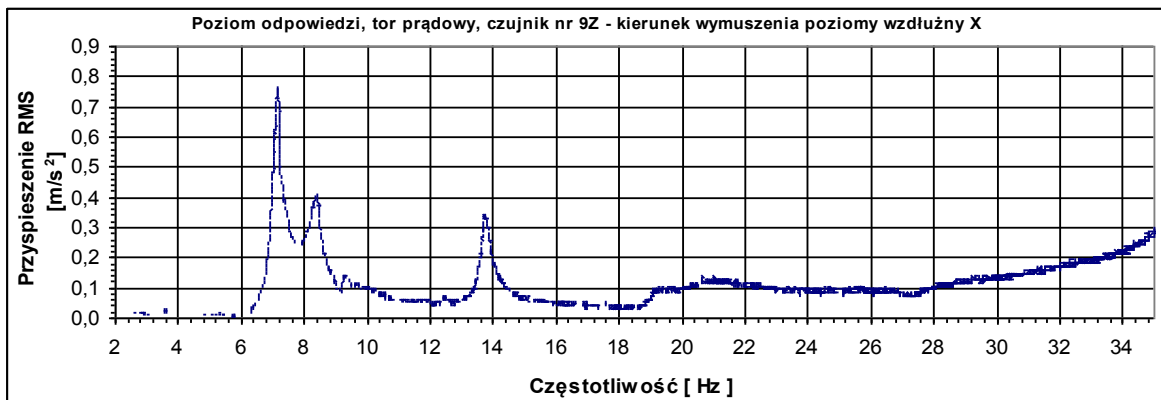
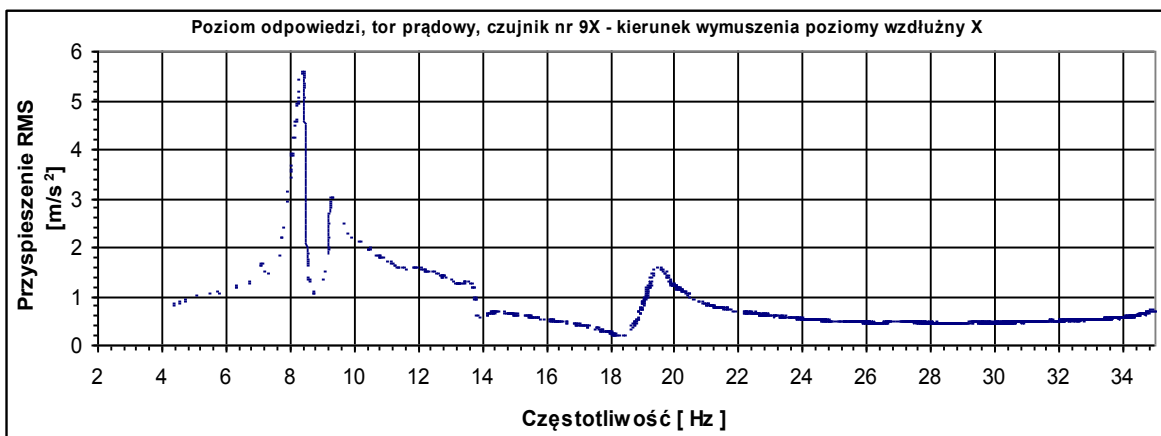
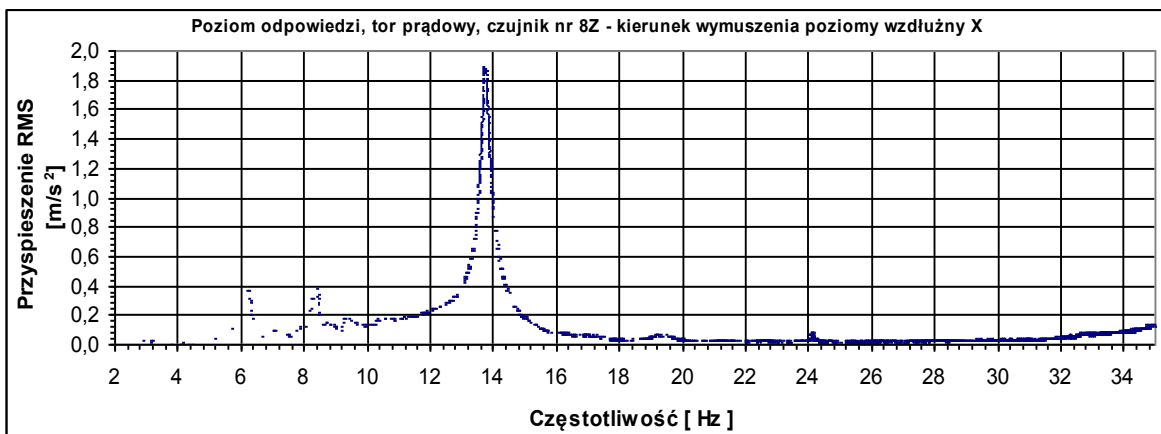
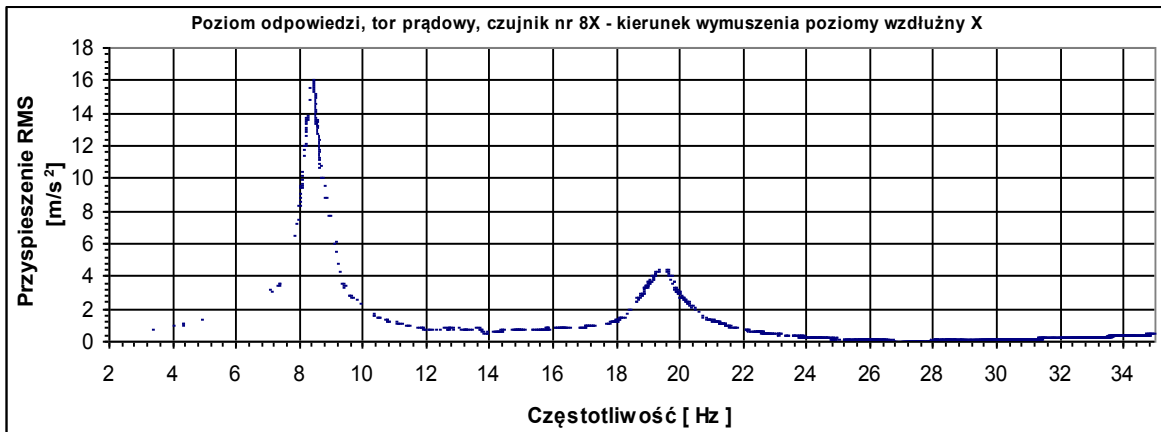
Tabela 3.61 prezentuje zestawienie wyników analiz naprężeń w postaci ekstremalnych wartości naprężeń dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych.

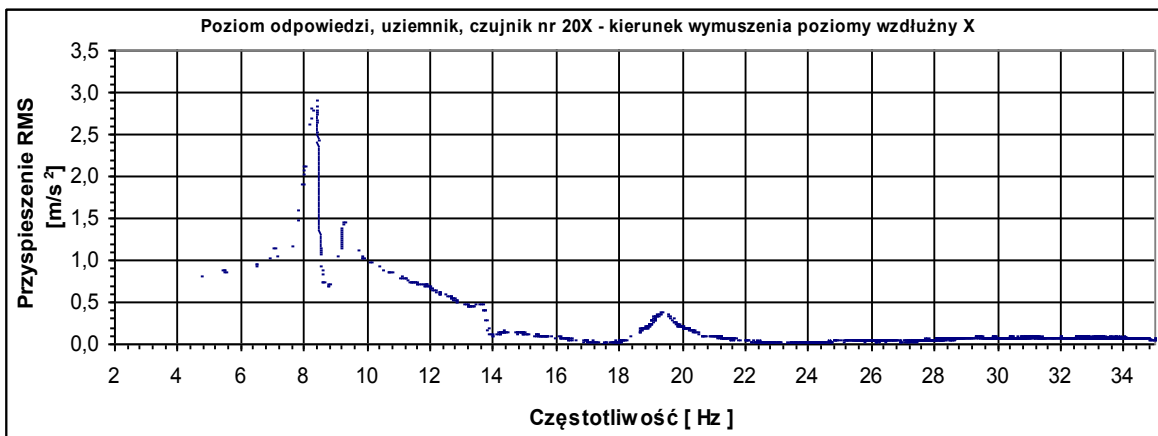
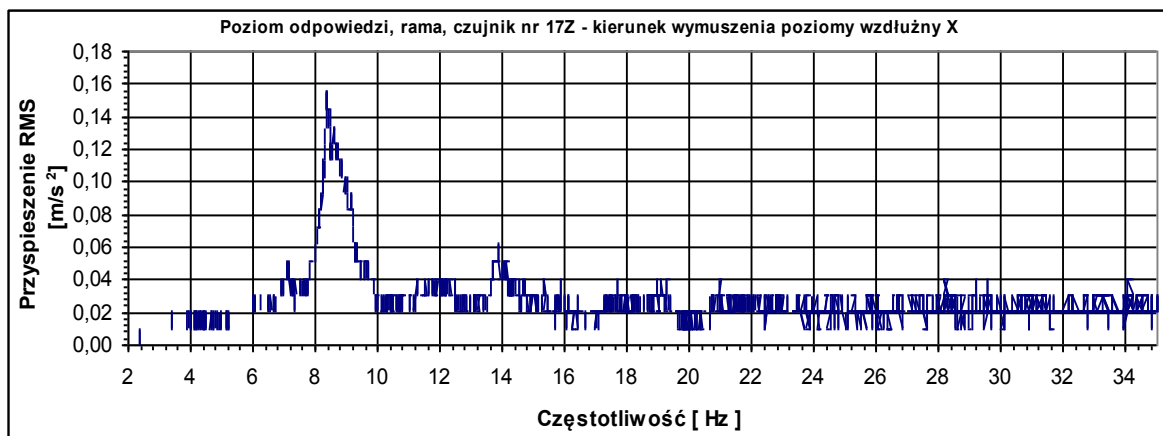
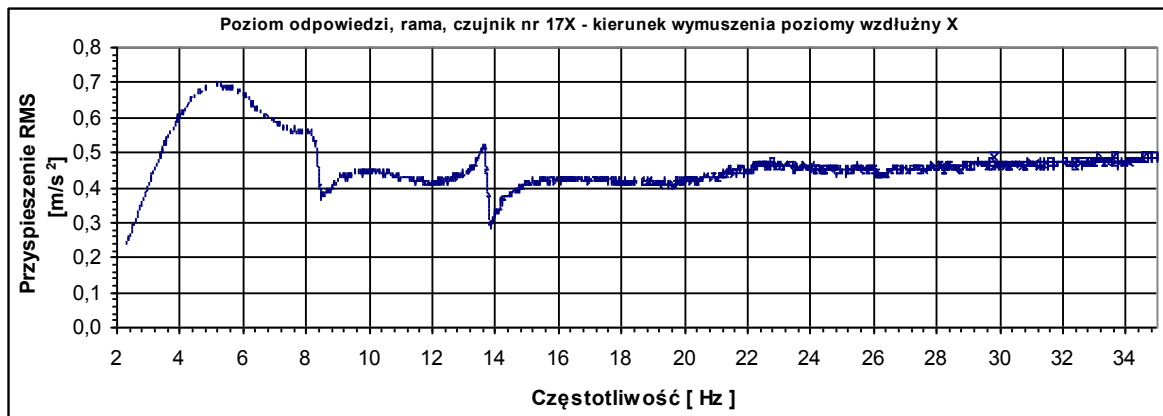
Punkt pomiarowy	Częstotliwość			Napężenia		Poziom zadany dla f_R
	f_R	f_R	f_R	Max	Min	RMS
	Hz	Hz	Hz	MPa	MPa	m/s^2
Kolumna I T1		8,39		0,93	-0,72	0,45
			13,69	0,99	-0,99	0,46
Kolumna I T2		8,39		6,46	-6,18	0,45
			13,69	0,79	-0,95	0,46
Kolumna II T3	7,09			1,64	-1,49	0,58
		8,30		3,49	-3,55	0,49
Kolumna II T4	7,09			1,68	-1,67	0,58
		8,30		1,09	-0,69	0,49
Rama T5		8,34		6,28	-5,04	0,47
Rama T6		8,34		22,28	-20,21	0,47
Rama T7		8,34		16,02	-16,16	0,47

Tabela 3.61. Zestawienie wyników analiz naprężeń dla wymuszenia w kierunku poziomym X dla odłącznika otwartego.

Wykresy charakterystyk dynamicznych w postaci przyspieszeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych 6, 10, 8, 9, 17 i 20 pokazano na Rys. 3.86.

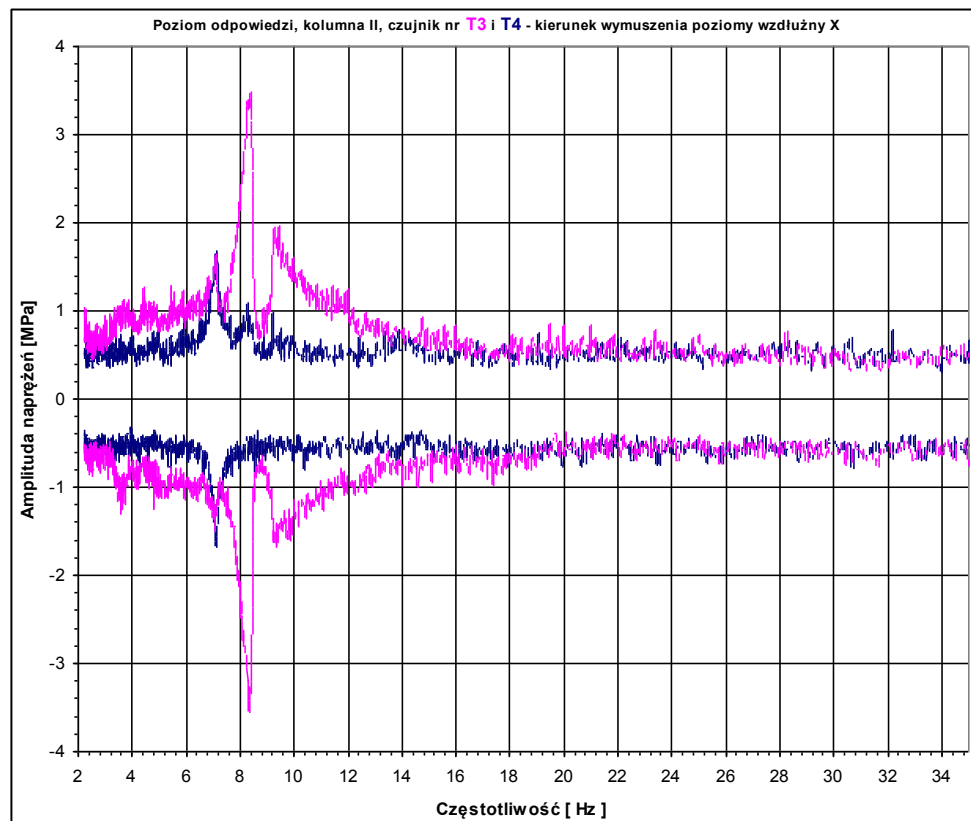
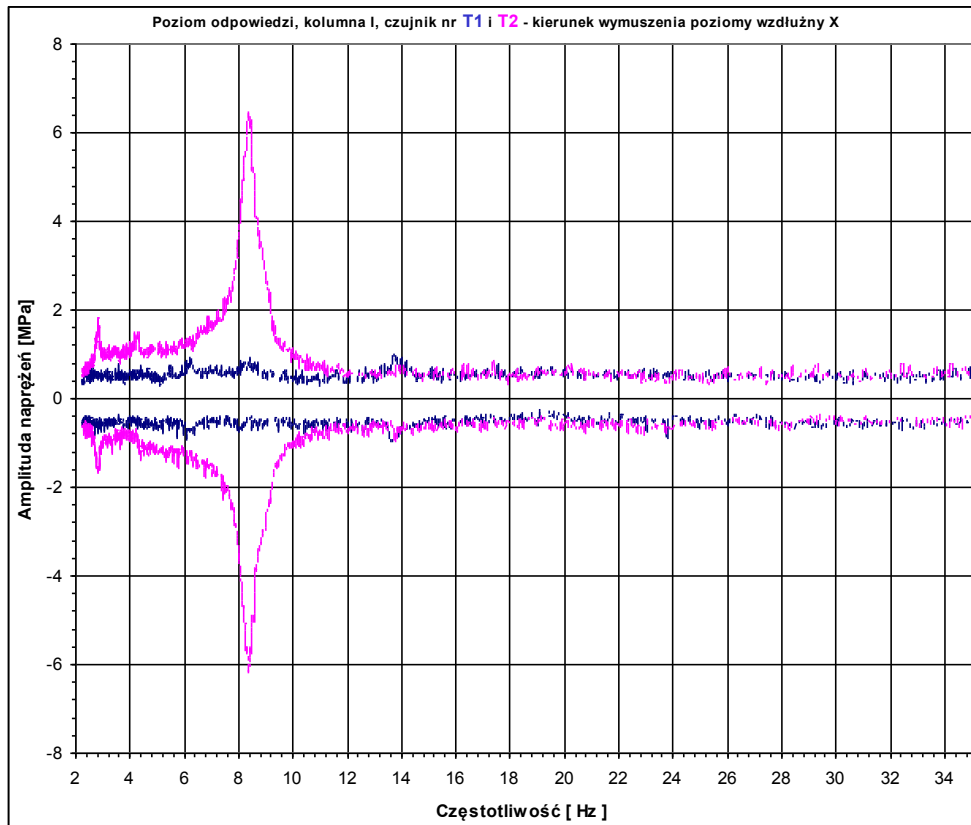


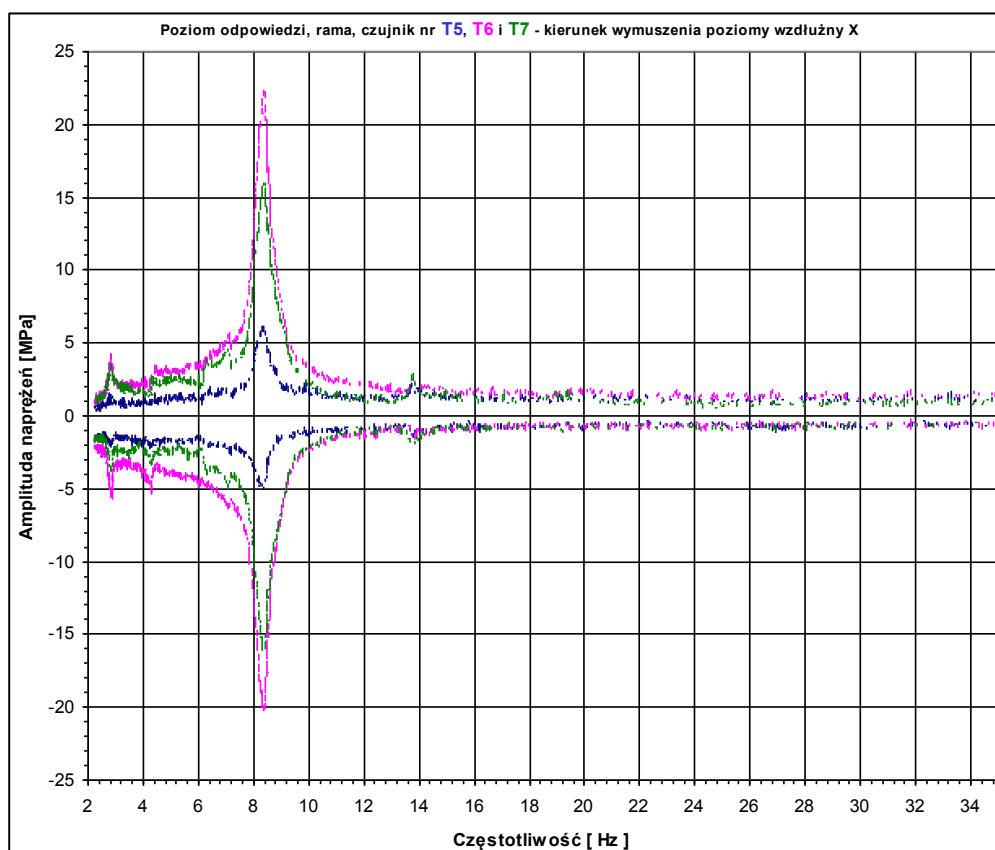




Rys. 3.86. Charakterystyki dynamiczne dla wymuszenia w kierunku X dla odłącznika otwartego.

Wykresy naprężeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych T1, T2, T3, T4, T5, T6 oraz T7 pokazano na Rys. 3.87.





Rys. 3.87. Wykresy naprężeń dla wymuszenia w kierunku X dla odłącznika otwartego.

3.4.3.6 Kierunek wymuszenia drgań pionowy Z, odłącznik otwarty

Tabela 3.62 prezentuje zestawienie wyników analiz przyspieszeń w postaci częstotliwości rezonansowych, wartości powiększenia drgań oraz współczynników dobroci i tłumienia.

Punkt pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa			Powiększenie drgań	Współczynnik		Poziom zadany ogólny amplituda
	f_R	f_R	f_R		dobroci	tłumienia	
	Hz	Hz	Hz		Q	ξ %	22Z m/s ²
Kolumna I 6Z			25,23	3,48	17,27	2,90	2,0
Kolumna II 10Z		23,97		2,17	15,35	3,26	
Tor prądowy 8Z			25,23	3,94	17,27	2,90	
Tor prądowy 8X	14,56			2,31	40,00	1,25	
Tor prądowy 8Y	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						
Tor prądowy 9Z		24,21		2,43	19,35	2,58	
Tor prądowy 9X	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						
Rama 17Z	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						
Rama 17Y	Brak rezonansów o powiększeniu drgań większym od 2						

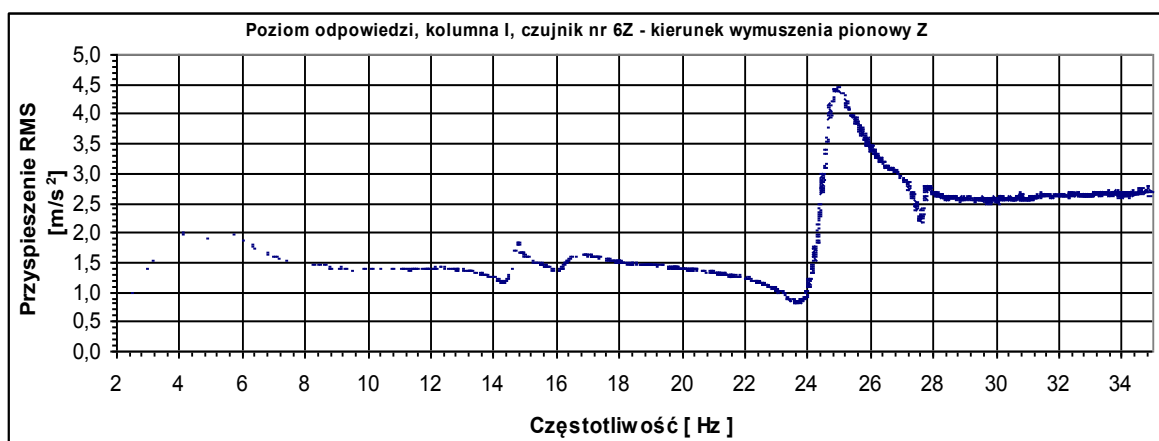
Tabela 3.62. Zestawienie wyników analiz przyspieszeń dla wymuszenia w kierunku pionowym Z dla odłącznika otwartego.

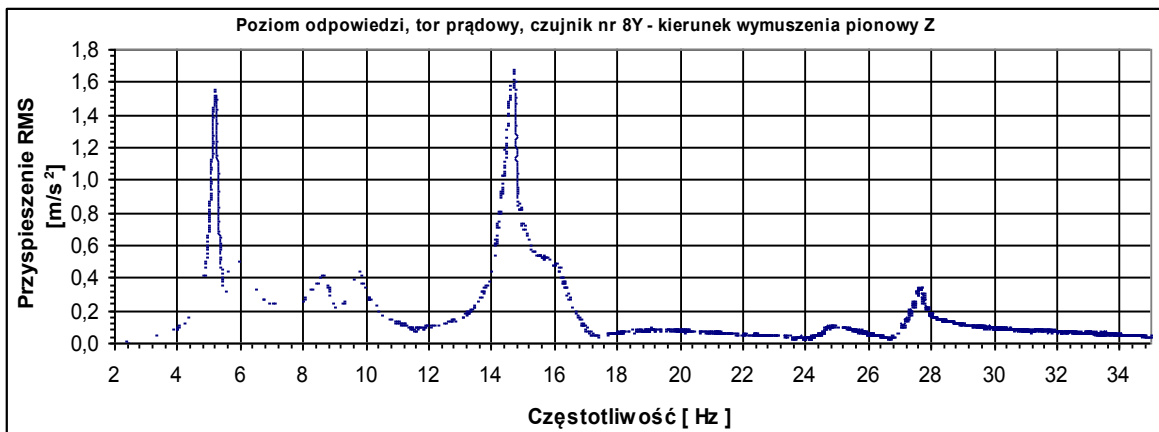
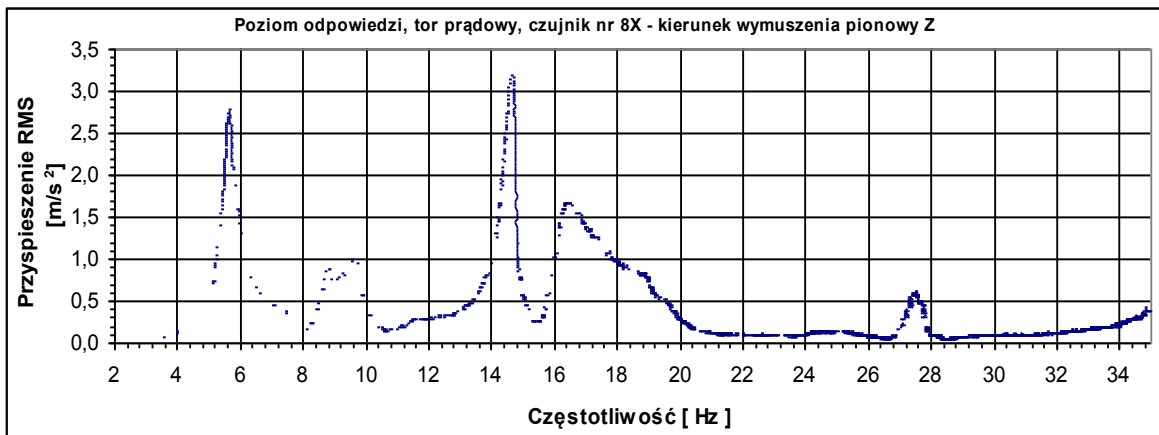
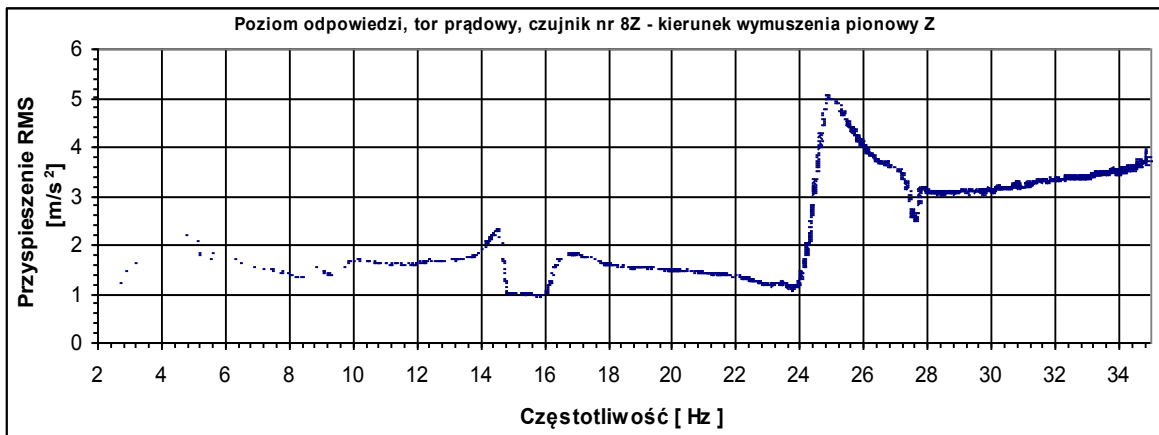
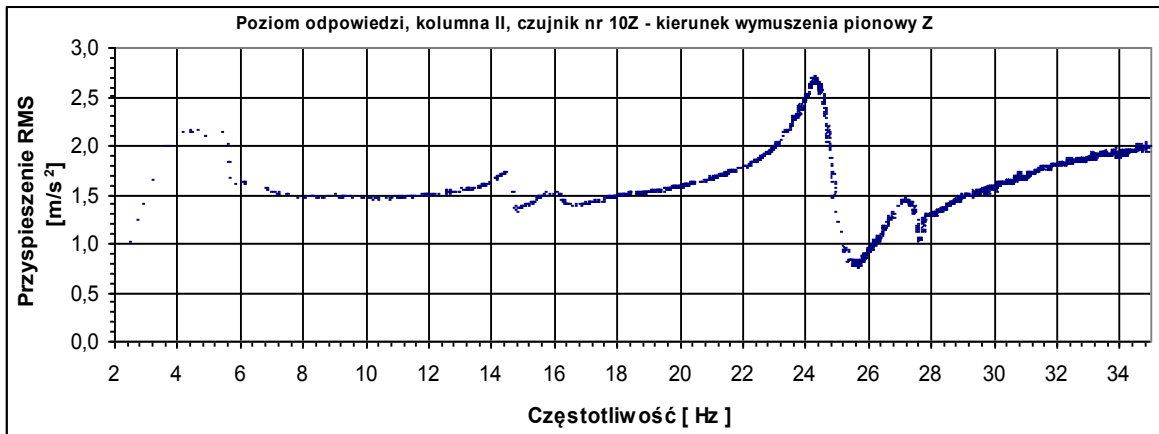
Tabela 3.63 prezentuje zestawienie wyników analiz naprężeń w postaci ekstremalnych wartości naprężeń dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych.

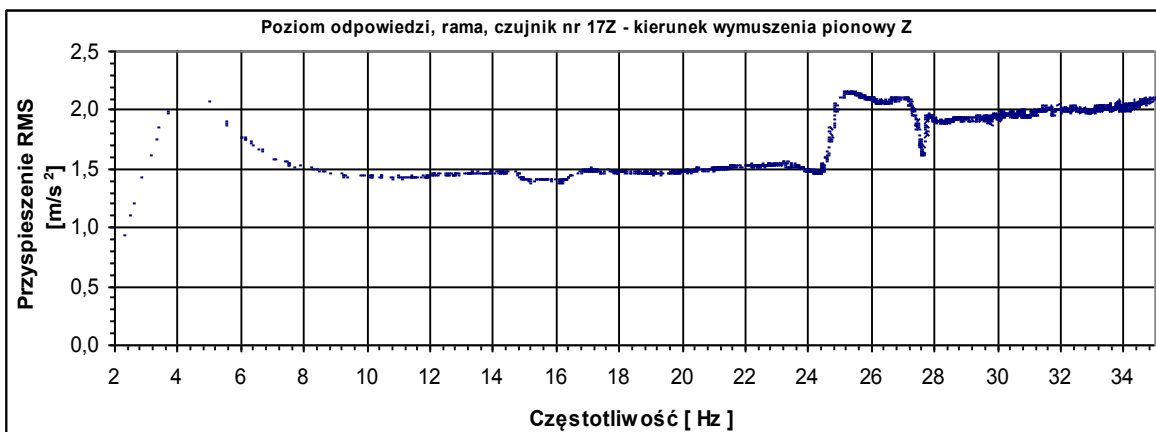
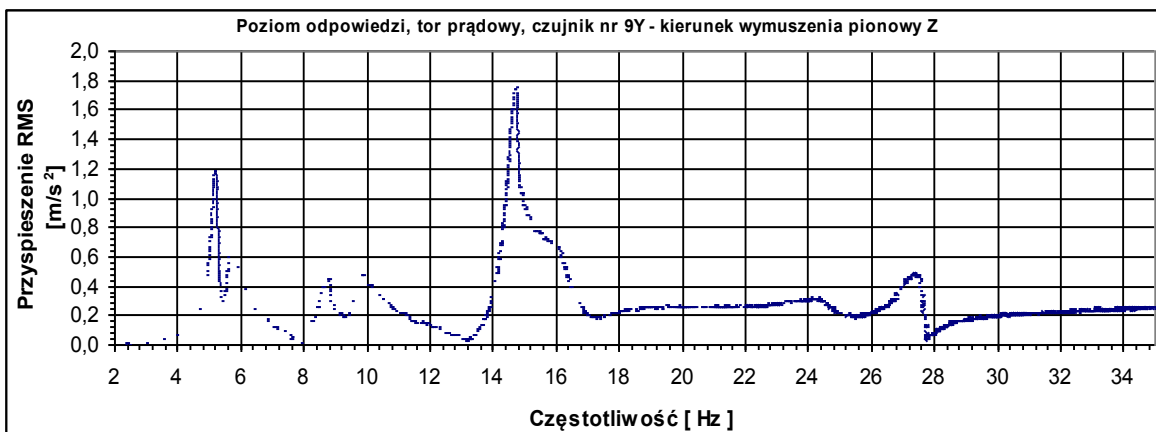
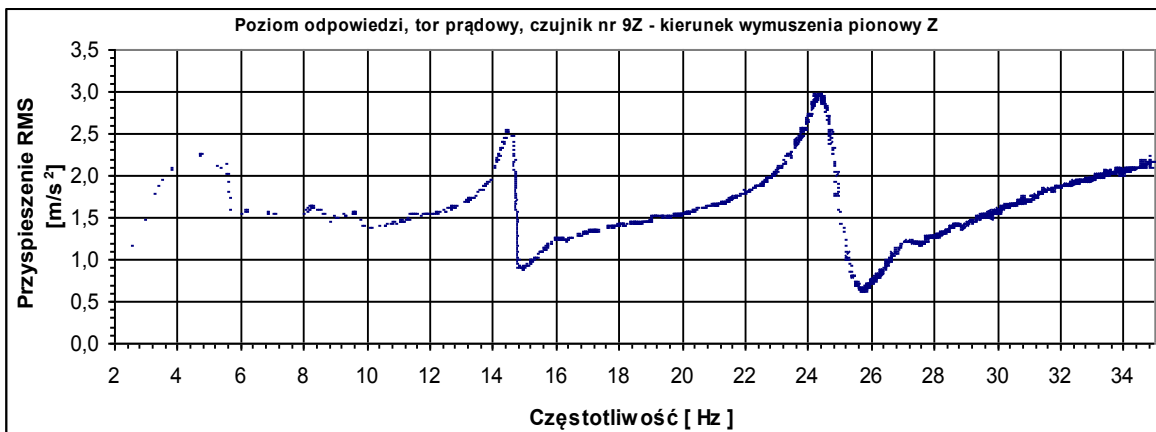
Punkt pomiarowy		Częstotliwość			Naprężenia		Poziom zadany dla f_R
		f_R	f_R	f_R	Max	Min	RMS
		Hz	Hz	Hz	MPa	MPa	m/s^2
Kolumna I	T1	5,15			1,24	-1,42	2,06
			5,62		0,60	-0,80	1,84
				14,51	0,99	-1,15	1,40
Kolumna I	T2	5,15			0,89	-0,76	2,06
			5,62		1,87	-1,79	1,84
				14,51	0,93	-0,92	1,40
Kolumna II	T3	5,13			0,75	-0,59	2,07
			5,53		1,90	-1,75	1,91
				14,61	1,22	-1,26	1,41
Kolumna II	T4	5,13			1,18	-1,01	2,07
			5,53		0,97	-0,80	1,91
				14,61	1,10	-1,23	1,41
Rama	T5	5,04			1,64	-1,58	2,07
			5,56		2,56	-2,24	1,88
				14,60	0,84	-1,08	1,41
Rama	T6	5,04			2,44	-1,55	2,07
			5,56		5,84	-5,93	1,88
				14,60	2,82	-2,79	1,41
Rama	T7	5,04			2,87	-2,96	2,07
			5,56		4,00	-4,29	1,88
				14,60	1,40	-1,28	1,41

Tabela 3.63. Zestawienie wyników analiz naprężeń dla wymuszenia w kierunku pionowym Z dla odłącznika otwartego.

Wykresy charakterystyk dynamicznych w postaci przyspieszeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych 6, 10, 8, 9 i 17 pokazano na Rys. 3.88.

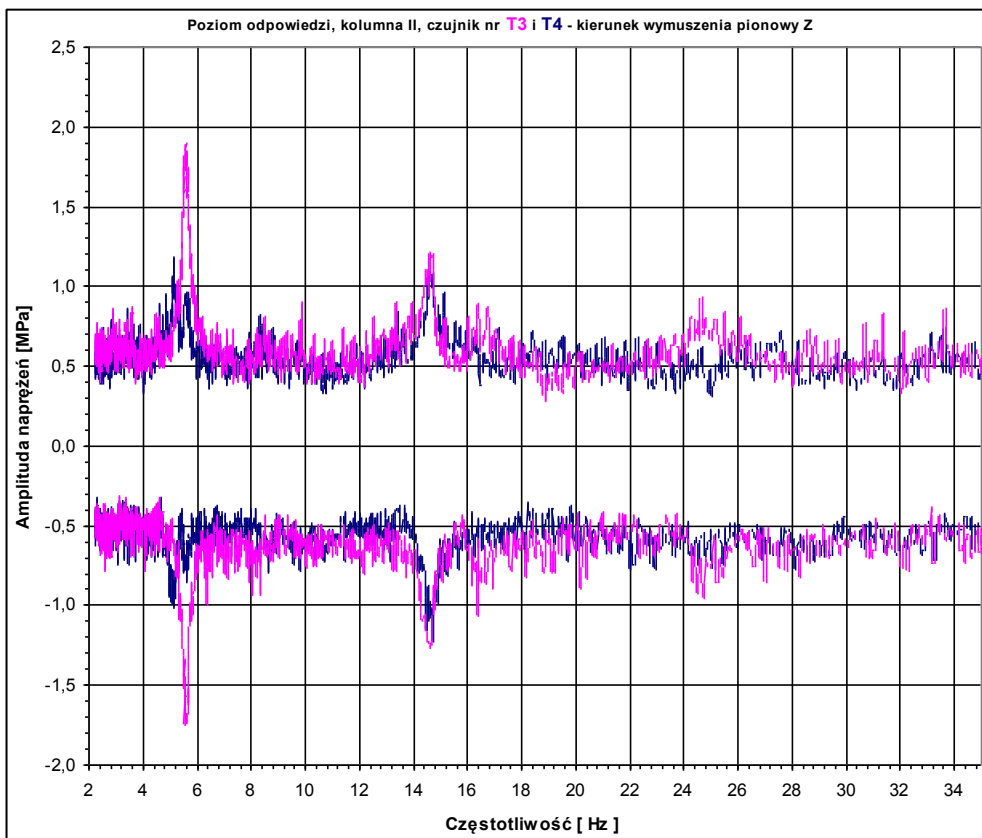
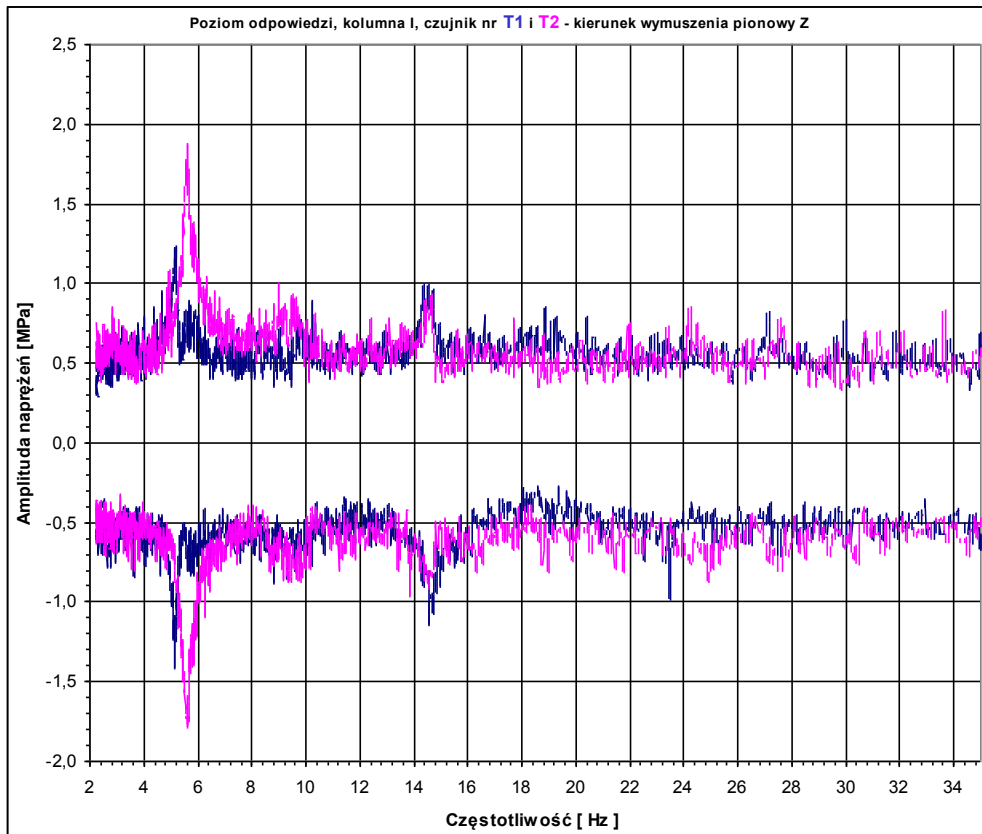


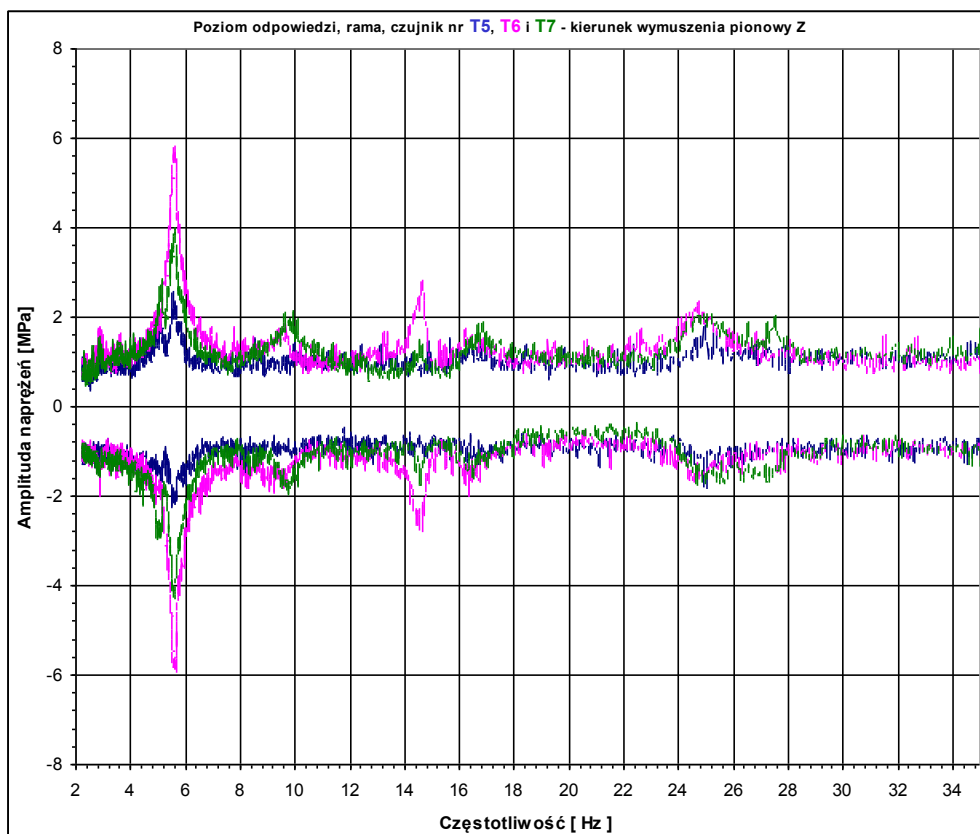




Rys. 3.88. Charakterystyki dynamiczne dla wymuszenia w kierunku Z dla odłącznika otwartego.

Wykresy naprężeń w funkcji częstotliwości dla punktów pomiarowych T1, T2, T3, T4, T5, T6 oraz T7 pokazano na Rys. 3.89.





Rys. 3.89. Wykresy naprężeń dla wymuszenia w kierunku Z dla odłącznika otwartego.

3.4.4 Zestawienie wyników badań modalnych na stole wstrząsowym

Tabela 3.64 zestawia wyniki badań modalnych na stole wstrząsowym, prezentując dominujące częstotliwości drgań własnych dla odłącznika zamkniętego.

WYNIKI BADAŃ MODALNYCH NA STOLE WSTRZĄSOWYM DLA ODŁĄCZNIKA ZAMKNIĘTEGO			
BADANIA IMPULSOWE		BADANIA SWEEP-SINE	
Kierunek poprzeczny Y	Analiza przyspieszeń	Analiza przyspieszeń	Analiza naprężeń
	Częstotliwość Hz	Częstotliwość Hz	Częstotliwość Hz
	$F_{R1}=6,49$	$F_{R1}=6,23$	$F_{R1}=6,15$
Kierunek wzdłużny X	$F_{R1}=8,50$	$F_{R1}=8,49$	$F_{R1}=8,48$

Tabela 3.64. Zestawienie wyników badań modalnych na stole wstrząsowym dla odłącznika zamkniętego.

Tabela 3.65 zestawia wyniki badań modalnych na stole wstrząsowym, prezentując dominujące częstotliwości drgań własnych dla odłącznika otwartego.

WYNIKI BADAŃ MODALNYCH NA STOLE WSTRZĄSOWYM DLA ODŁĄCZNIKA OTWARTEGO			
BADANIA IMPULSOWE		BADANIA SWEEP-SINE	
Kierunek poprzeczny Y	Analiza przyspieszeń	Analiza przyspieszeń	Analiza naprężeń
	Częstotliwość Hz	Częstotliwość Hz	Częstotliwość Hz
	$F_{R1}=6,37$	$F_{R1}=6,22$	$F_{R1}=6,19$
Kierunek wzdłużny X	$F_{R1}=8,86$	$F_{R1}=8,41$	$F_{R1}=8,39$

Tabela 3.65. Zestawienie wyników badań modalnych na stole wstrząsowym dla odłącznika otwartego.

Wartości przedstawione w Tabeli 3.64 oraz 3.65 wskazują, iż w wyniku różnych badań modalnych (badania impulsowe – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza

przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza naprężeń) przeprowadzonych dla odłącznika zamocowanego na stole wstrząsowym uzyskano bardzo podobne wartości dominujących częstotliwości drgań własnych konstrukcji. W przypadku odłącznika zamkniętego, różnica w wyznaczonych wartościach wyniosła 5,2% i 0,2%, odpowiednio dla formy poprzecznej i wzdłużnej drgań konstrukcji. Z kolei, w przypadku odłącznika w konfiguracji otwartej, różnice w wartościach dominujących częstotliwości dla formy poprzecznej i wzdłużnej drgań konstrukcji wyniosły odpowiednio: 2,8% i 5,3%.

3.5 Badania zniszczeniowe

Po badaniach sweep-sine wykonano szereg testów eksperymentalnych na stole wstrząsowym mających na celu określenie odporności sejsmicznej konstrukcji odłącznika. Jednocześnie celem tych badań było również zbadanie, która część konstrukcji jest najsłabsza i najszybciej ulegnie zniszczeniu. Zamierzenie to zrealizowano poprzez stopniowe zwiększanie wymuszenia dynamicznego doprowadzając w efekcie do uszkodzenia całej konstrukcji.

3.5.1 Wybór sygnału do testów zniszczeniowych

Wybór sygnału do wykonania testów zniszczeniowych uwarunkowany jest zwykle parametrami pracy stanowiska badawczego. Stanowisko badawcze wykorzystane w niniejszych badaniach, ze względu na konstrukcję części hydraulicznej wzbudnika drgań i części mechanicznej platformy stołu wstrząsowego, posiada następujące parametry pracy:

kierunek wymuszania drgań poziomy X i Y:

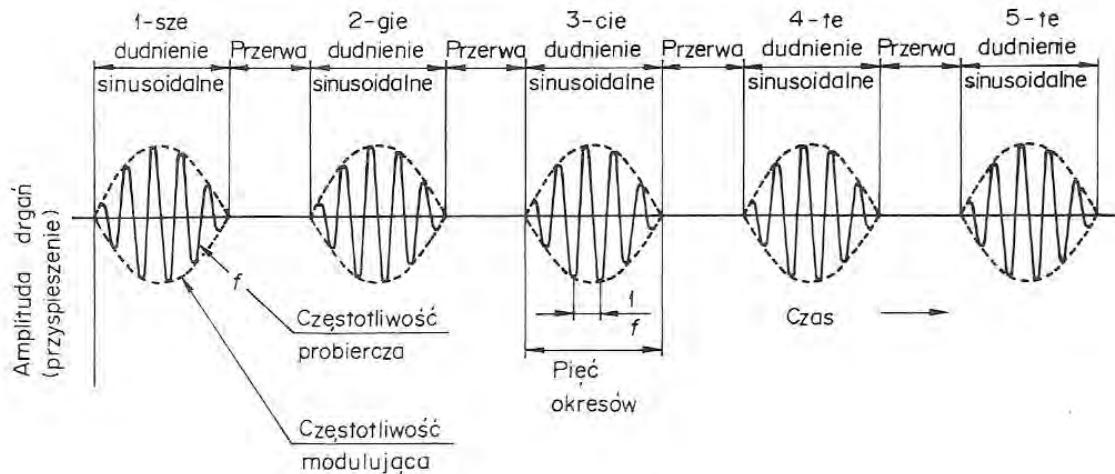
- maksymalne przemieszczenie platformy stołu wstrząsowego ± 60 mm,
- prędkość tłoczyska wzbudnika 0,975 m/s dla częstotliwości 1,04 Hz,

kierunek wymuszania drgań pionowy Z:

- maksymalne przemieszczenie platformy stołu wstrząsowego ± 150 mm,
- prędkość tłoczyska wzbudnika 0,975 m/s dla częstotliwości 1,04 Hz.

Ograniczenie przemieszczenia platformy stołu wstrząsowego nie daje możliwości prawidłowego i bezawaryjnego generowania drgań na stanowisku badawczym przebiegami o przemieszczeniu przekraczającym ± 60 mm dla kierunku wymuszania drgań poziomego X i Y w zakresie częstotliwości $1 \div 35$ Hz. W związku z powyższym nie było możliwości wykorzystania rzeczywistych zapisów trzęsień ziemi i do testów zniszczeniowych zastosowano metodę badania dudnieniem sinusoidalnym zgodnie z normą PN-EN 60068-3-3 i PN-IEC 68-2-59. Odpowiadało to potrzebom eksperymentu badawczego i możliwościom technicznym dla układu wymuszania drgań wzbudnik-stół. Do realizacji badań zniszczeniowych przyjęto sygnał w postaci ciągu pięciu dudnień sinusoidalnych modulowanych czterema okresami dla wartości przemieszczenia (generowanie drgań przy kontroli przemieszczenia) odpowiadających modulacjom pięciookresowym dla wartości przyspieszenia (pomiar przyspieszenia platformy stołu wstrząsowego) z uwzględnieniem

współczynnika falowego $\alpha = 1$ i geometrycznego $G = 1$ zgodnie z normą PN-IEC 68-2-59, dla klasy sejsmicznej ogólnej, konwencjonalną metodą badania z amplitudą znormalizowaną i możliwością oceny konstrukcji odłącznika zgodnie z normą PN-EN 60068-3-3. Normatywny przykład sygnału w postaci przyspieszenia w funkcji czasu ciągu pięciu dudnień sinusoidalnych modulowanych pięcioma okresami przedstawiono na Rys. 3.90.



Rys. 3.90. Przykład sygnału dudnień sinusoidalnych (PN-EN 60068-3-3).

Parametry sygnału dudnień sinusoidalnych wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych:

- ciąg pięciu dudnień sinusoidalnych, modulacja dudnienia czterookresowa dla sterowania przemieszczeniem, pięciookresowa w pomiarach przyspieszenia,
- częstotliwość modulacji dudnienia (probiercza) 6,23 Hz, dobrana na podstawie badań sweep-sine jako częstotliwość rezonansowa kolumny I i II dla kierunku wymuszenia Y w pozycji zamkniętej pracy odłącznika (patrz podrozdział 3.4.3.1),
- amplituda sygnału dobrana do parametrów badania, w ramach możliwości technicznych układu wymuszania drgań wzbudnik-stół,
- stopniowanie przyspieszenia drgań platformy stołu wstrząsowego.

3.5.2 Przebieg testów

Wymuszenie generowane było przez wzbudnik hydrauliczny tylko dla kierunku poprzecznego Y. Badania zniszczeniowe przeprowadzono dla odłącznika w konfiguracji zamkniętej. Pomiary zarejestrowano z częstotliwością próbkowania 660 Hz dla czasu rejestracji 15,15 sekundy. Po wykonaniu każdego testu dokonywano zapisu danych pomiarowych oraz oględzin konstrukcji odłącznika, a następnie przystępowano do kolejnego

testu, z odpowiednio zwiększonymi parametrami wymuszenia. Wartości oczekiwane przyspieszeń platformy stołu wstrząsowego dla kolejnych testów przedstawiono w Tabeli 3.66.

Tabela stopniowania przyspieszenia drgań - wartości oczekiwane			
Nr testu	Poziom eksploatacyjny wg PN-EN 60068-3-3	Przyspieszenie platformy stołu	Przemieszczenie platformy stołu
		m/s ²	mm
1		3	1,96
2	I	6	3,93
3	II	9	5,89
4		12	7,86
5	III	15	9,82
6		18	11,79
7		21	13,75
8		24	15,71
9		27	17,68
10		30	19,64
11		36	23,57
12		42	27,50
13		30	19,64
14		36	23,57
15		18	11,79
16		27	17,68

Tabela 3.66. Wartości oczekiwane przyspieszeń platformy stołu wstrząsowego dla kolejnych testów.

Po każdym z testów od nr 1 do nr 10 nie zaobserwowano żadnych oznak uszkodzeń. Po wykonaniu testu nr 11 zauważono oznaki pęknięcia spoiny spawalniczej mocującej ceownik (fundament z ceowników 100 mm) pod kolumną II po stronie drążka uziemnika. Wykonano pomiar nr 12 i potwierdzono występowanie pęknięcia spoiny spawalniczej. Badania przerwano i przeprowadzono szczegółowe oględziny odłącznika. W wyniku przeprowadzonych oględzin zaobserwowano następujące uszkodzenia:

- pęknięta spoina spawalnicza mocująca ceownik (fundament) od wewnętrznej strony konstrukcji pod kolumną II po stronie drążka uziemnika,
- pęknięty ceownik (fundament) nad pękniętą spoiną spawalniczą mocującą ceownik (fundament) od wewnętrznej strony konstrukcji pod kolumną II po stronie drążka uziemnika,
- pęknięta spoina spawalnicza mocująca (fundament) od zewnętrznej strony konstrukcji pod kolumną II po stronie ramienia uziemnika,
- trwałe odkształcenie blokady odłącznika wykonanej z płaskownika grubości 10 mm,

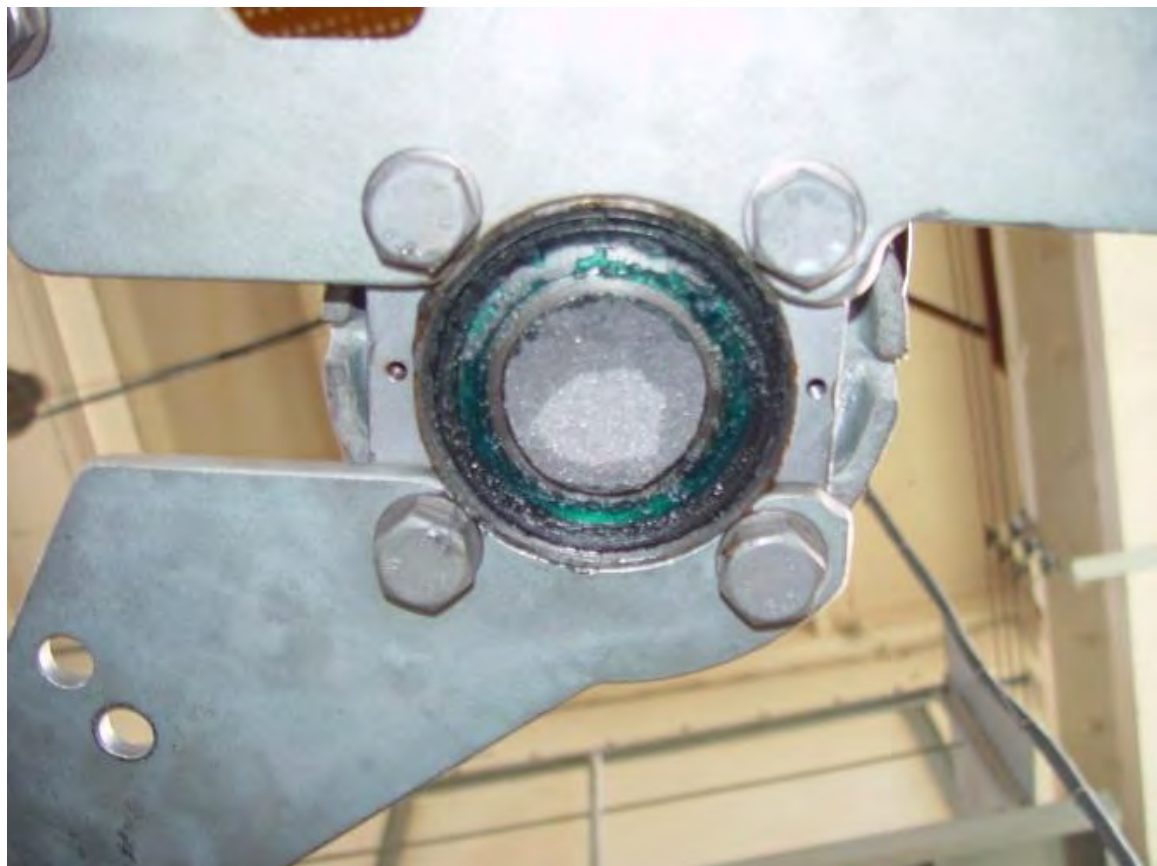
- poluzowane śruby M14 mocujące odłącznik do fundamentu z ceowników.

Ponieważ uszkodzenia dotyczyły przede wszystkim fundamentu pod odłącznikiem (górna część stołu wstrząsowego), a nie samego odłącznika, postanowiono naprawić uszkodzony fundament poprzez zaspawanie pękniętych spoin oraz pęknięć ceownika fundamentu.

Wznowiono badania zniszczeniowe dla niższych wartości oczekiwanych przyspieszeń (patrz Tabela 3.66). Po wykonaniu testu nr 13 i 14 ponownie przeprowadzono dokładne oględziny odłącznika oraz fundamentu. Stwierdzono pęknięcia spoin spawalniczych mocujących ceowniki (fundament z ceowników 100 mm) pod kolumną I oraz trwałe odkształcenie blokady odłącznika. Podobnie jak poprzednio, postanowiono naprawić uszkodzony fundament poprzez zaspawanie pękniętych spoin i badania zniszczeniowe wznowiono dla niższych wartości oczekiwanych przyspieszeń (patrz Tabela 3.66). Podczas realizacji testu nr 16 doszło do trwałego uszkodzenia konstrukcji odłącznika. Pierwszymi objawami uszkodzenia był wyraźny efekt dźwiękowy wywołany pęknięciem elementu konstrukcji odłącznika i znaczny wzrost amplitudy przyspieszenia drgań na szczycie kolumny I i II w czasie generowania drgań trzeciego z ciągu pięciu dudnień sinusoidalnych. Po wykonaniu testu nr 16 przeprowadzono dokładne oględziny odłącznika. W wyniku oględzin stwierdzono:

- pęknięcie czopa łożyska w stopie obrotowej kolumny II,
- trwałe odkształcenie blokady odłącznika wykonanej z płaskownika o grubości 10 mm,
- poluzowane śruby M14 mocujące odłącznik do fundamentu z ceowników.

Pęknięcie czopa łożyska w stopie obrotowej kolumny II przedstawiono na Fot. 3.13.



Fot. 3.13. Pęknięty czop łożyska w stopie obrotowej kolumny II.

3.5.3 Wyniki testów zniszczeniowych

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów dla testów nr: 2, 3, 5, 15 i 16, uznając je za reprezentatywne.

3.5.3.1 Test zniszczeniowy nr 2, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty

Tabela 3.67 prezentuje zestawienie wartości ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz wartości ekstremalnych przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 2.

Punkt pomiarowy	Wartość przyspieszenia		Wartość przemieszczenia	
	max	min	max	min
	m/s ²	m/s ²	mm	mm
Platforma stołu 22Y	6,16	-6,41	3,91	-4,24
Kolumna I 6Y	40,30	-41,50		
Kolumna II 10Y	57,70	-59,20		
Tor prądowy 8Y	68,50	-68,70		
Tor prądowy 8Z	1,91	-1,67		
Tor prądowy 9Y	65,40	-66,20		
Tor prądowy 9Z	1,43	-1,00		
Rama 17Y	6,08	-6,22		
Rama 17Z	1,11	-1,07		
Uziemnik 21Y	19,10	-19,40		

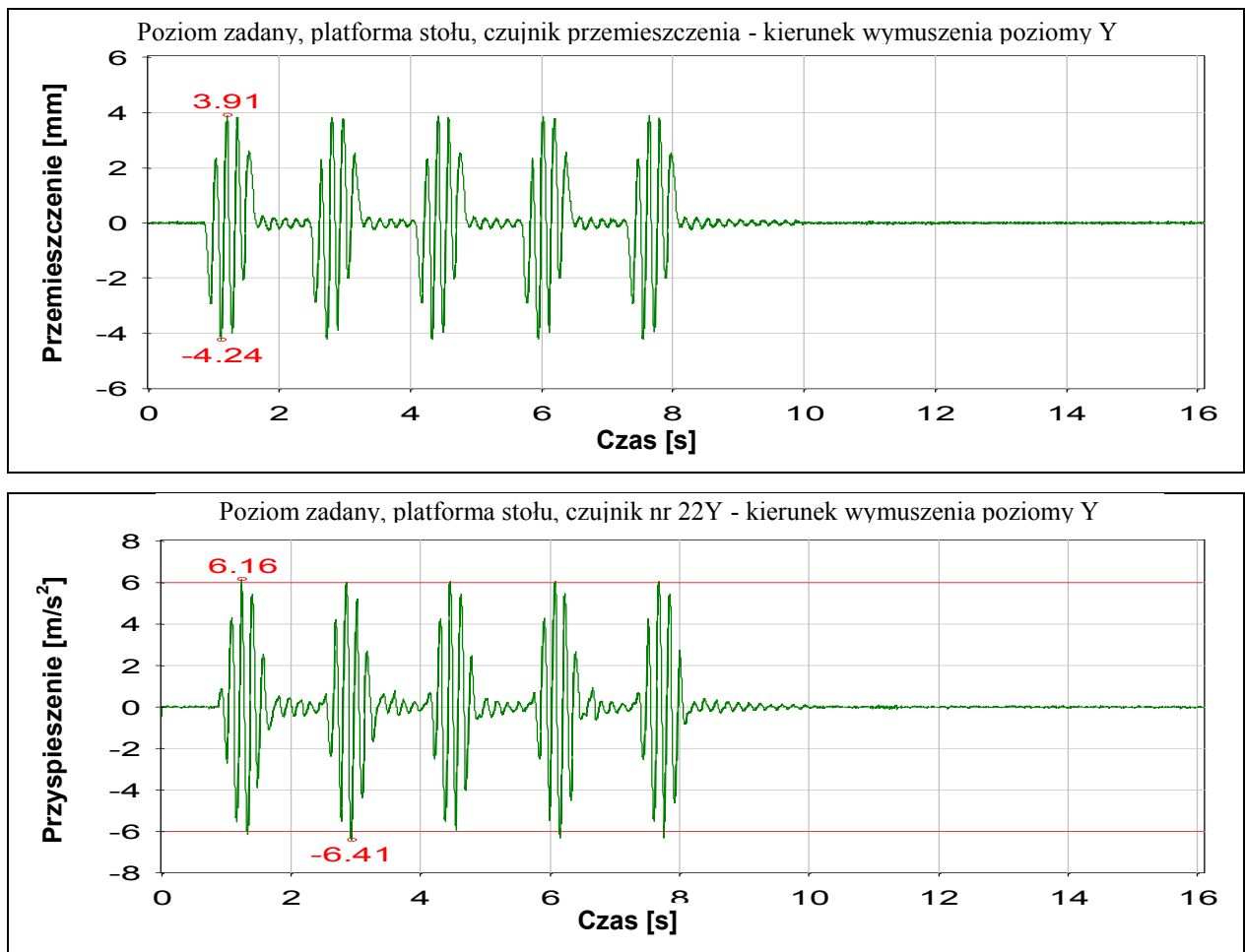
Tabela 3.67. Zestawienie ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 2.

W Tabeli 3.68 przedstawiono zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 2.

Punkt pomiarowy		Naprężenia	
		Max	Min
		MPa	MPa
Kolumna I	T1	2,34	-0,82
Kolumna I	T2	21,30	-21,10
Kolumna II	T3	23,20	-23,00
Kolumna II	T4	4,04	-1,30
Rama	T5	34,20	-32,40
Rama	T6	5,16	-5,26
Rama	T7	18,40	-19,10

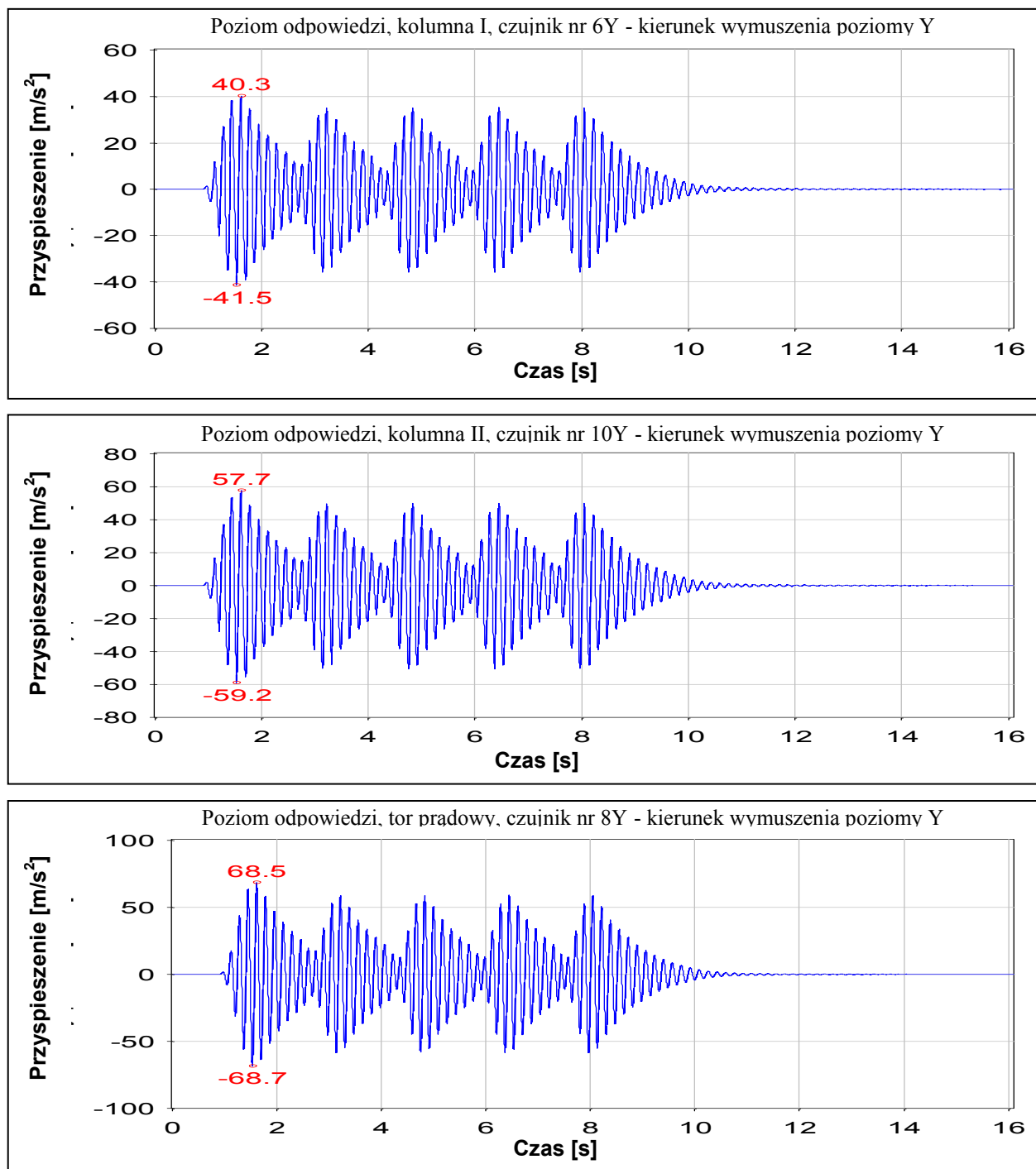
Tabela 3.68. Zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 2.

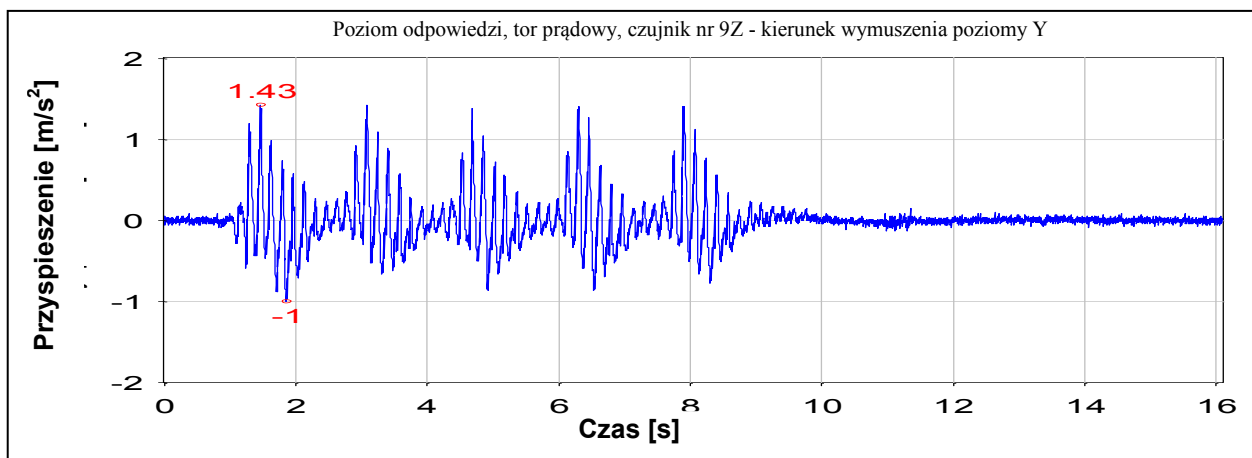
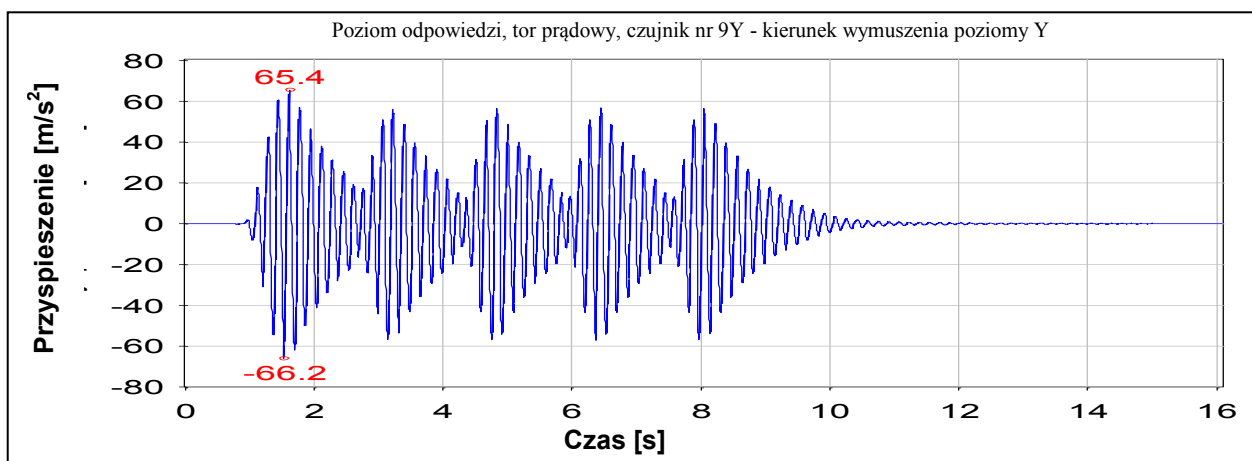
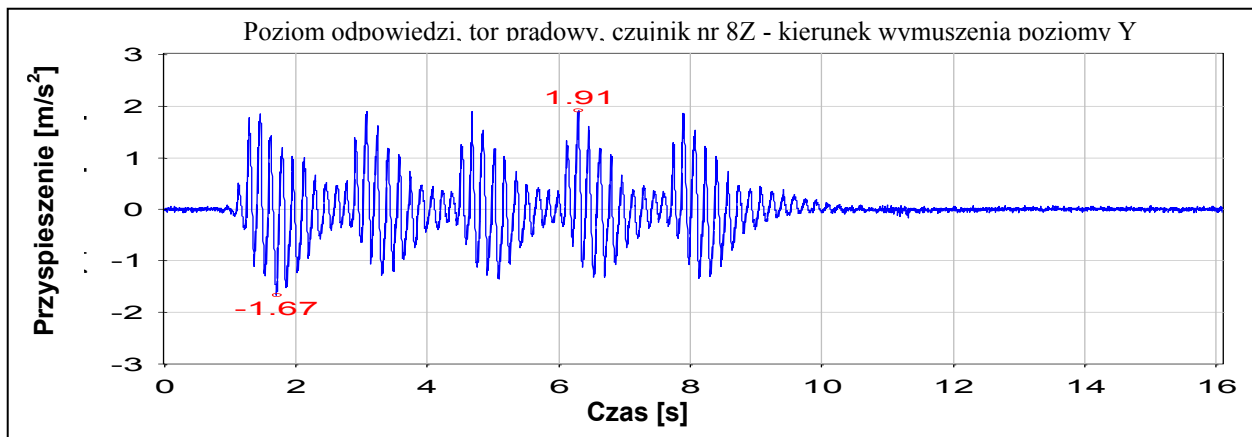
Na Rys. 3.91 przedstawiono wykresy wymuszenia dla testu zniszczeniowego nr 2 w postaci przebiegu przemieszczenia oraz przyspieszenia w funkcji czasu dla platformy stołu wstrząsowego (na wykresach zaznaczono wartości ekstremalne).

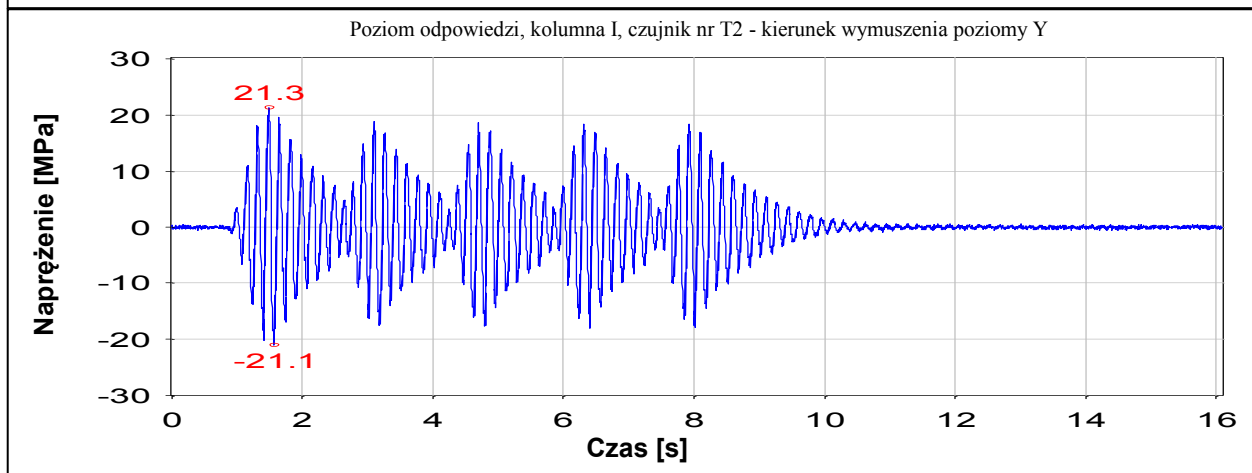
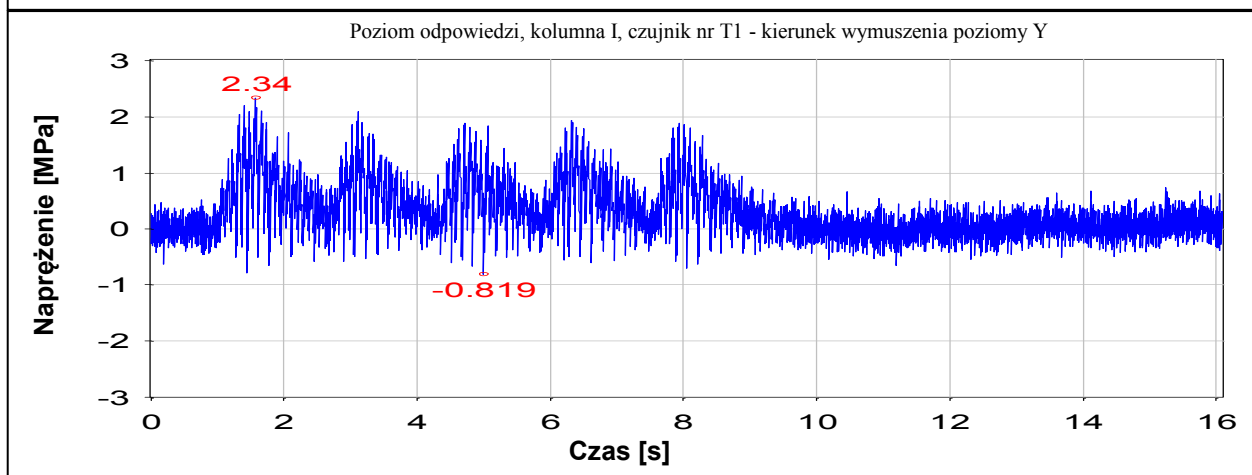
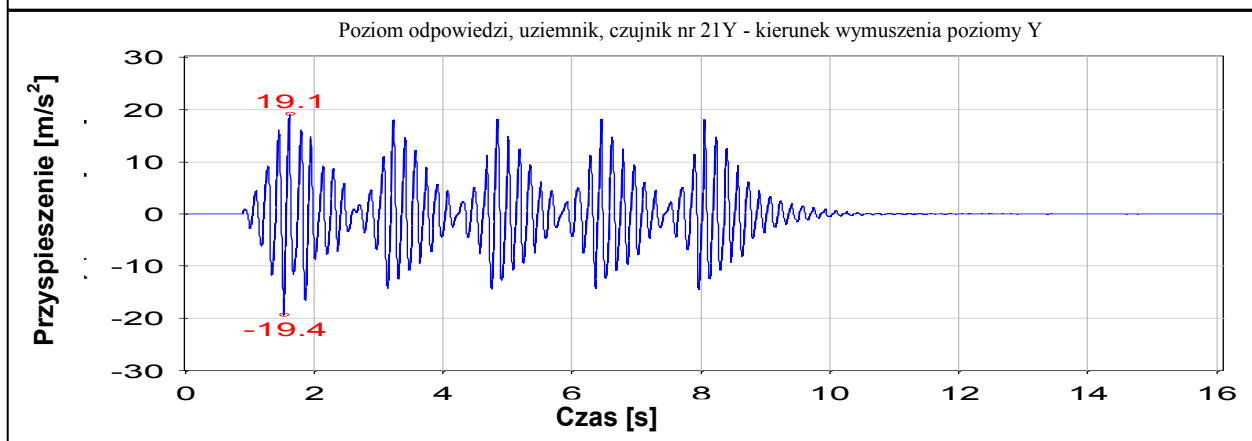
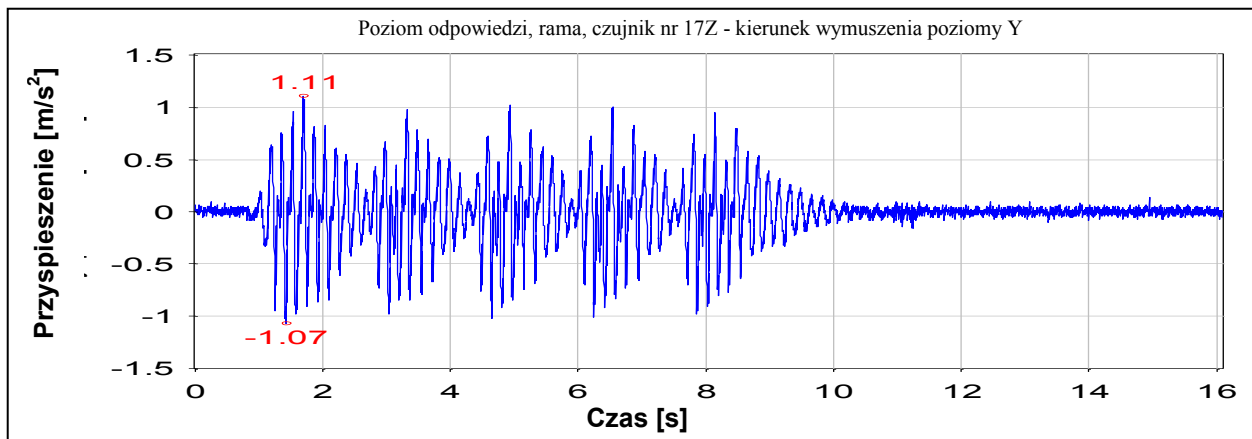


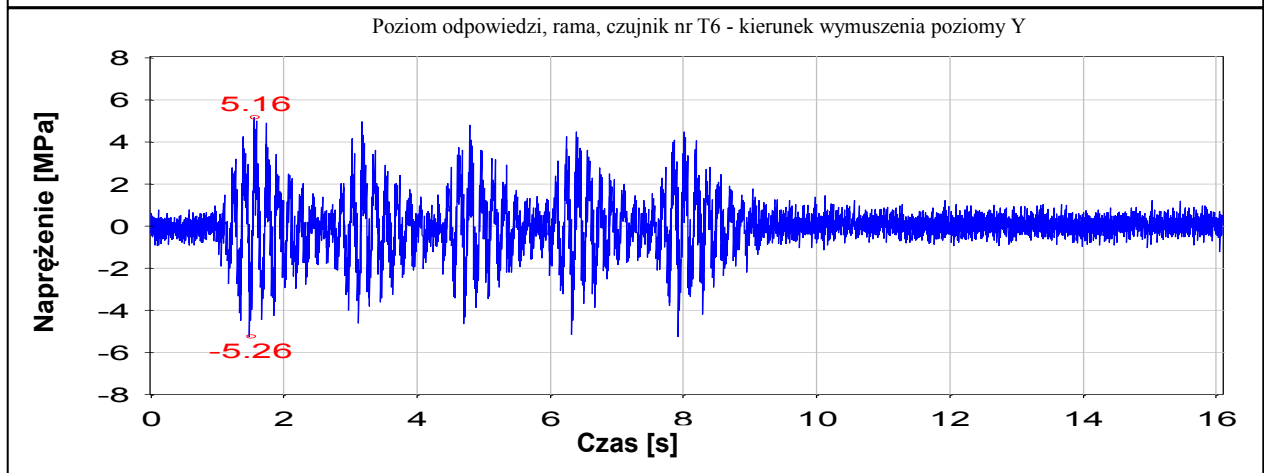
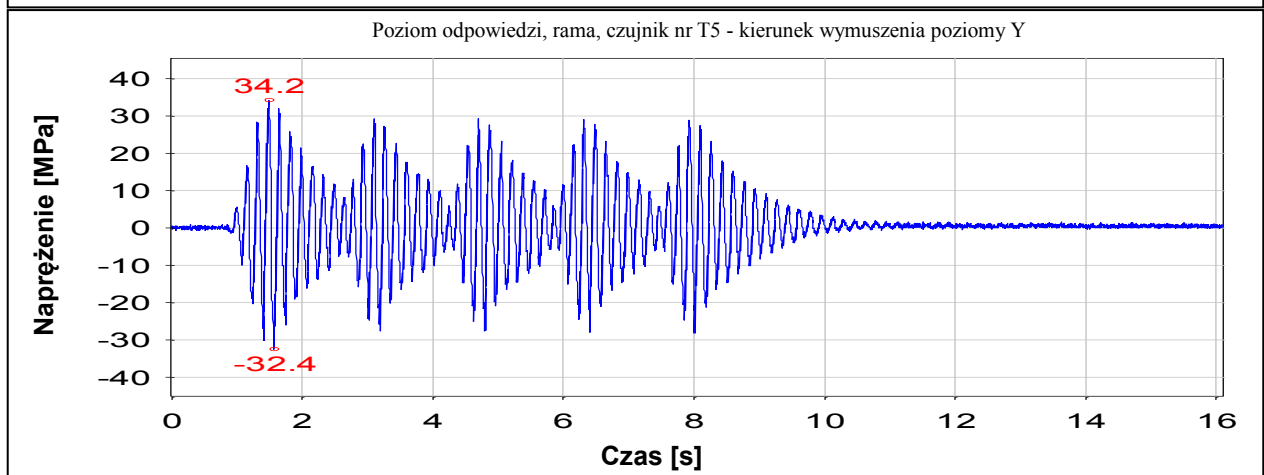
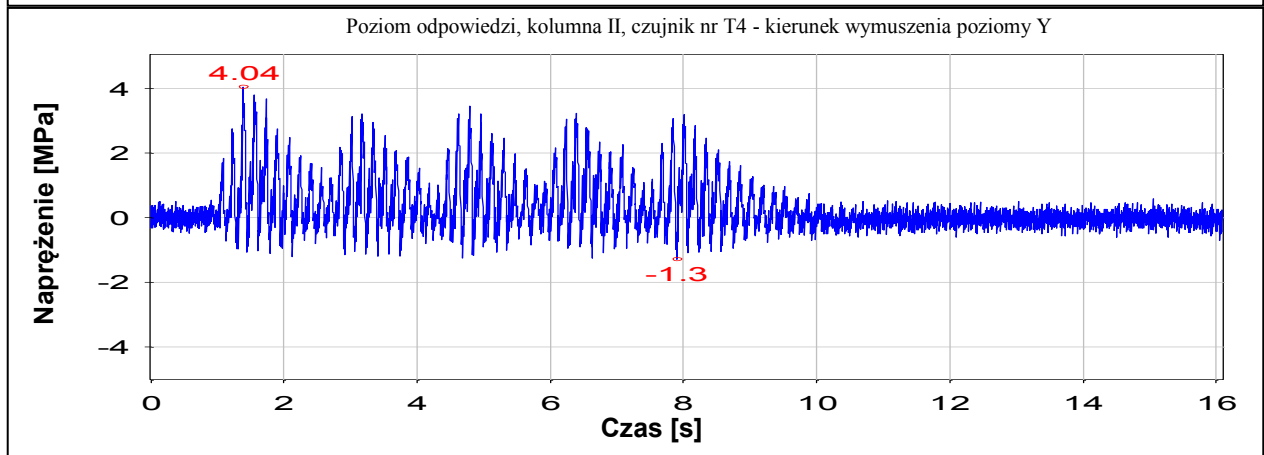
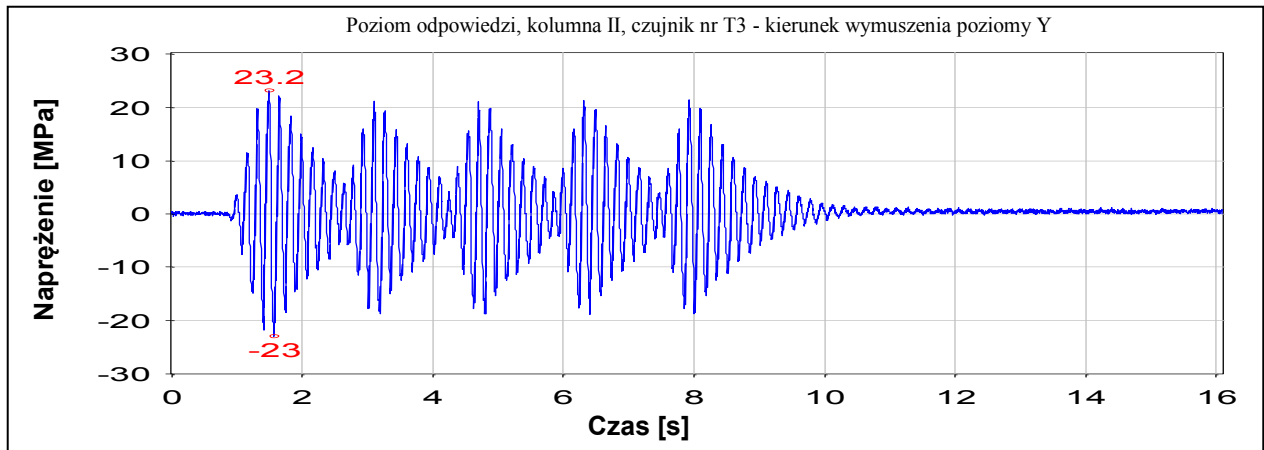
Rys. 3.91. Poziom zadany dla testu zniszczeniowego nr 2.

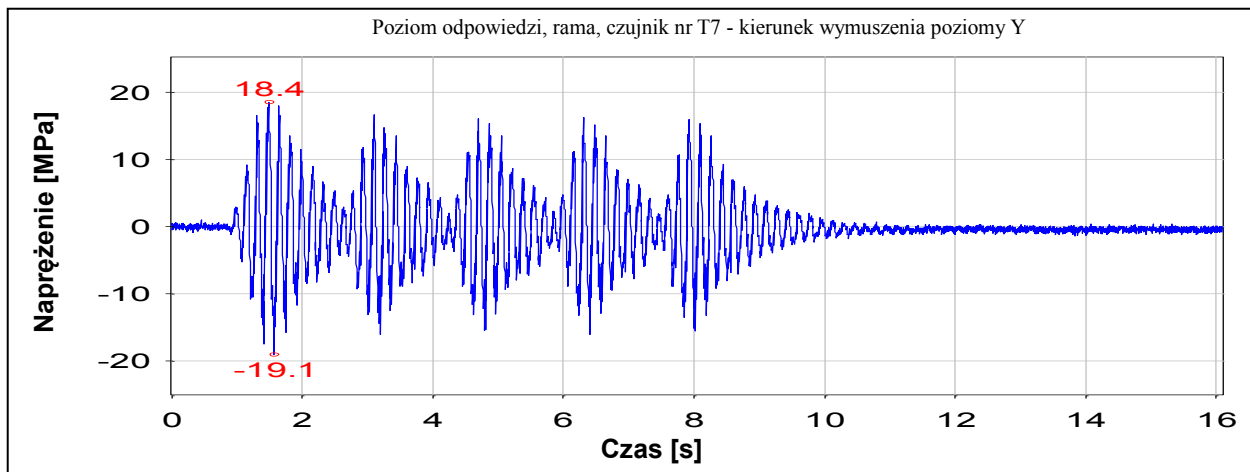
Rys. 3.92 prezentuje poziomy odpowiedzi konstrukcji odłącznika w postaci wykresów przebiegu przyspieszeń oraz naprężeń w funkcji czasu w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 2.











Rys. 3.92. Poziomy odpowiedzi dla testu zniszczeniowego nr 2.

3.5.3.2 Test zniszczeniowy nr 3, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty

Tabela 3.69 prezentuje zestawienie wartości ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz wartości ekstremalnych przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 3.

Punkt pomiarowy	Wartość przyspieszenia		Wartość przemieszczenia	
	Max	Min	Max	Min
	m/s ²	m/s ²	mm	mm
Platforma stołu 22Y	9,18	-11,40	5,93	-6,58
Kolumna I 6Y	57,20	-59,40		
Kolumna II 10Y	80,60	-85,00		
Tor prądowy 8Y	96,60	-98,00		
Tor prądowy 8Z	2,33	-3,40		
Tor prądowy 9Y	91,40	-95,60		
Tor prądowy 9Z	2,01	-2,31		
Rama 17Y	8,93	-8,96		
Rama 17Z	1,65	-1,32		
Uziemnik 21Y	26,30	-24,20		

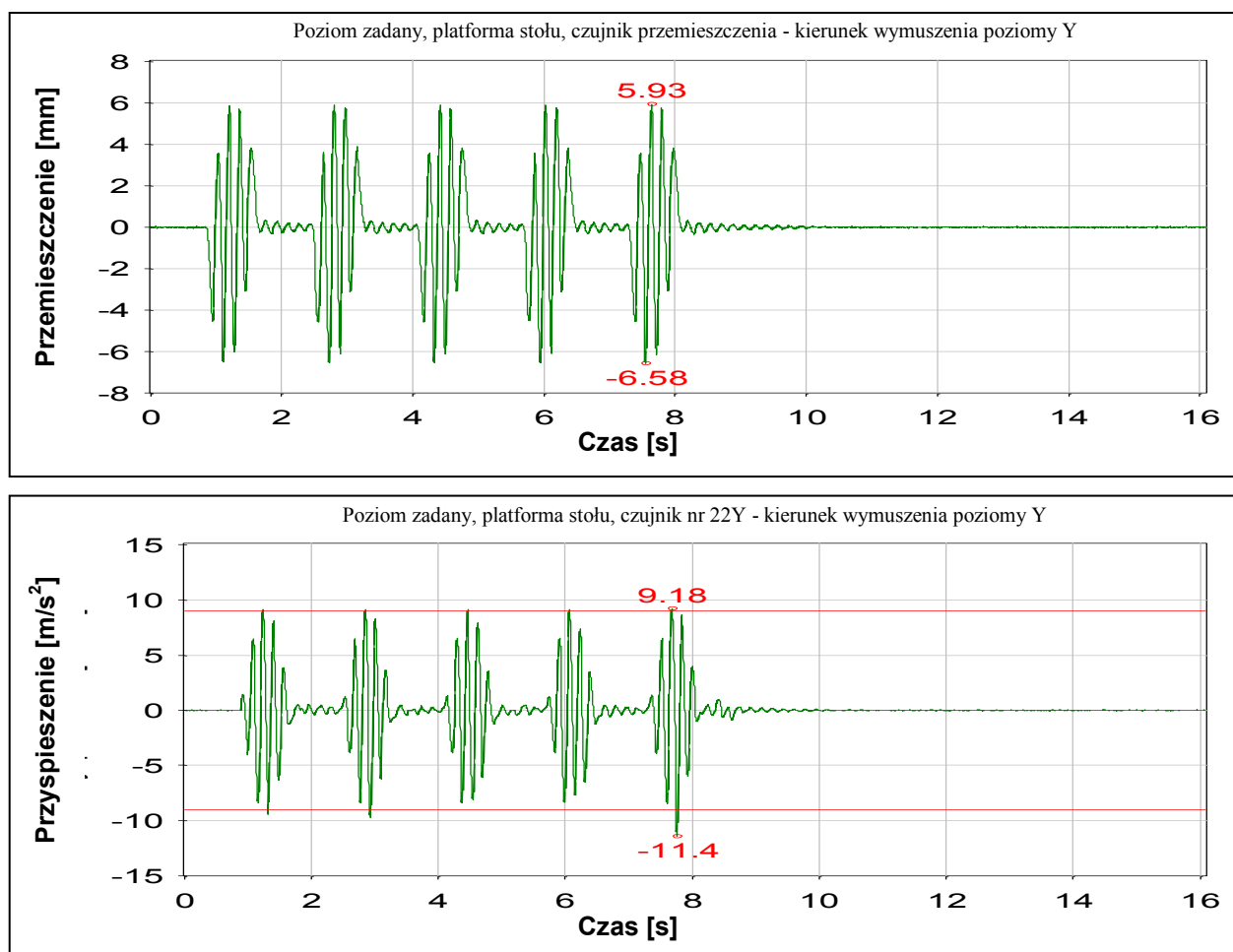
Tabela 3.69. Zestawienie ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 3.

W Tabeli 3.70 przedstawiono zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 3.

Punkt pomiarowy		Naprężenia	
		Max	Min
		MPa	MPa
Kolumna I	T1	4,01	-1,32
Kolumna I	T2	29,90	-29,80
Kolumna II	T3	34,70	-31,10
Kolumna II	T4	5,62	-2,06
Rama	T5	48,90	-46,80
Rama	T6	7,38	-6,34
Rama	T7	28,10	-23,20

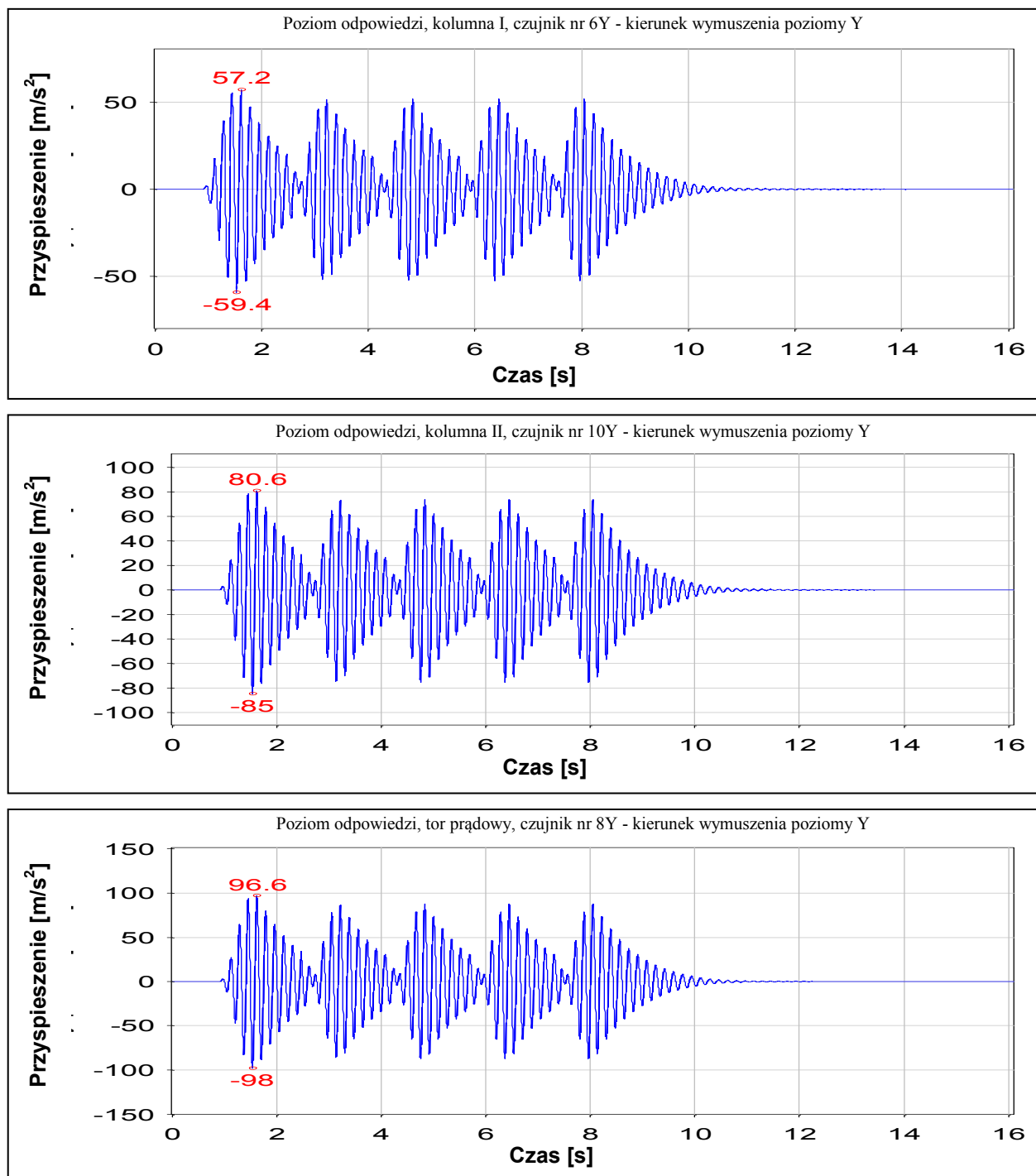
Tabela 3.70. Zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 3.

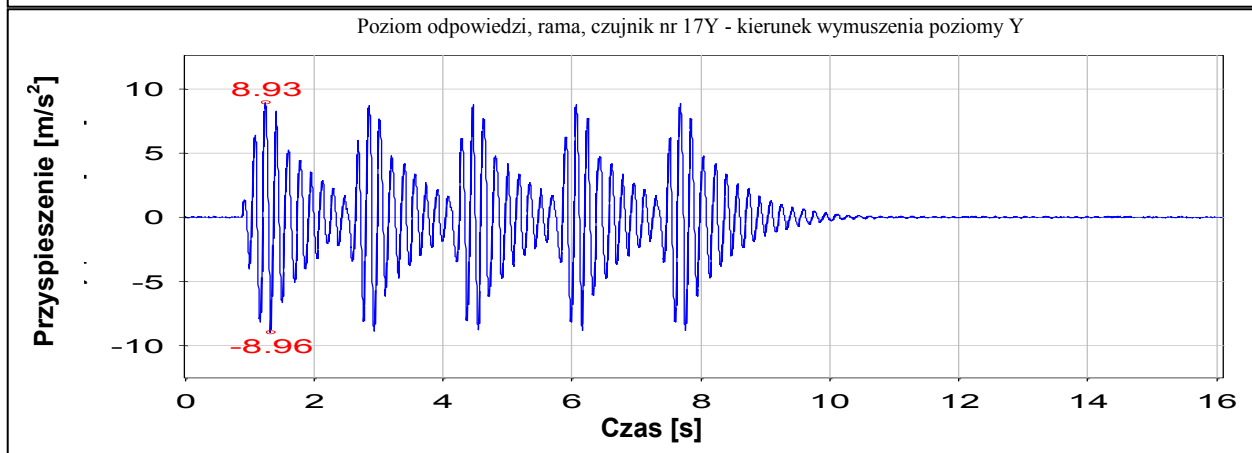
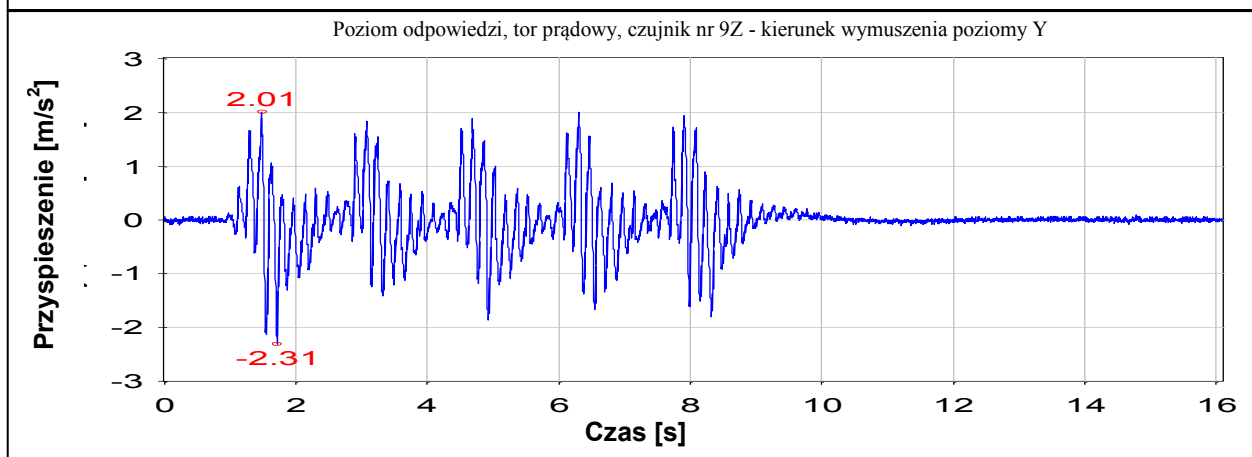
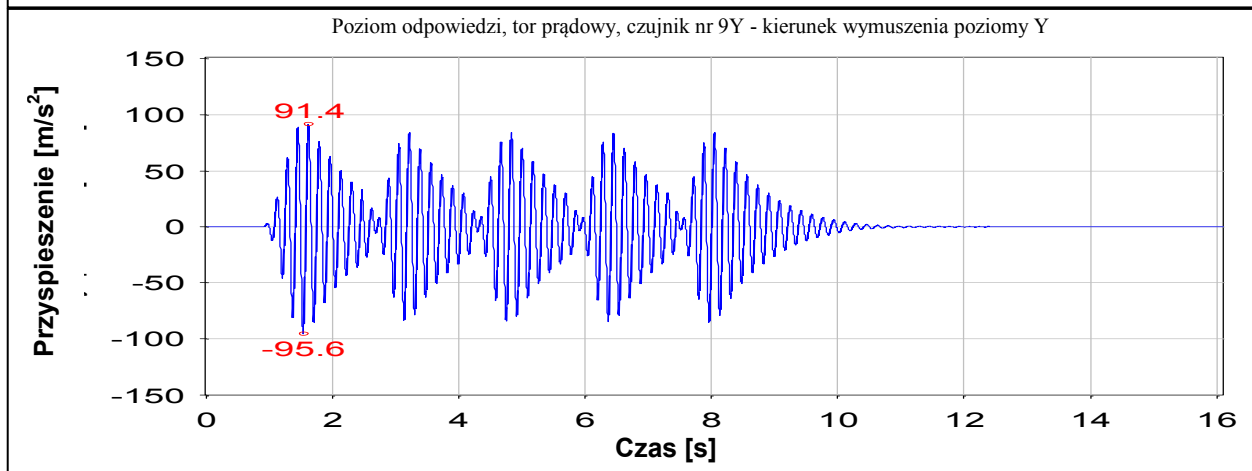
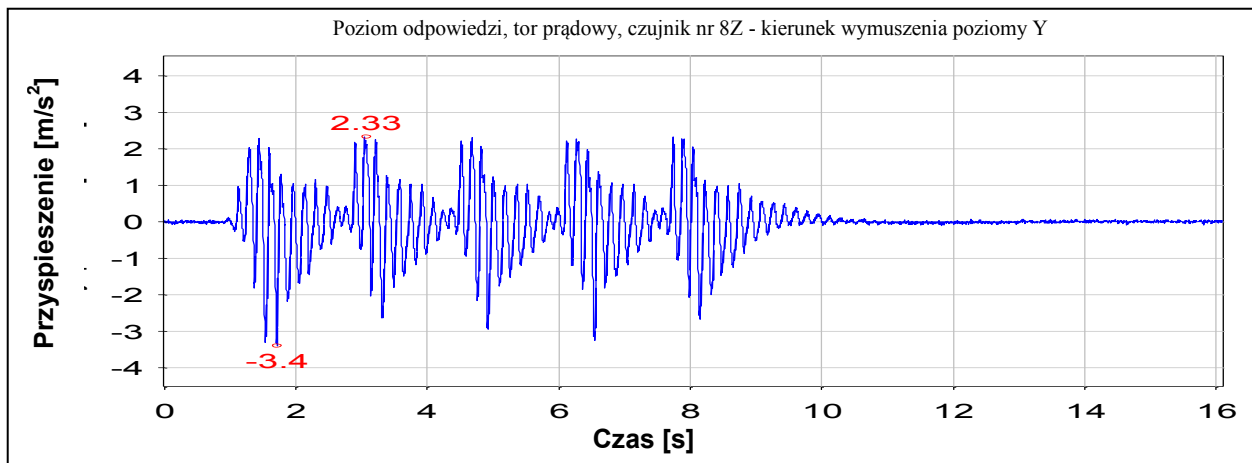
Na Rys. 3.93 przedstawiono wykresy wymuszenia dla testu zniszczeniowego nr 3 w postaci przebiegu przemieszczenia oraz przyspieszenia w funkcji czasu dla platformy stołu wstrząsowego (na wykresach zaznaczono wartości ekstremalne).

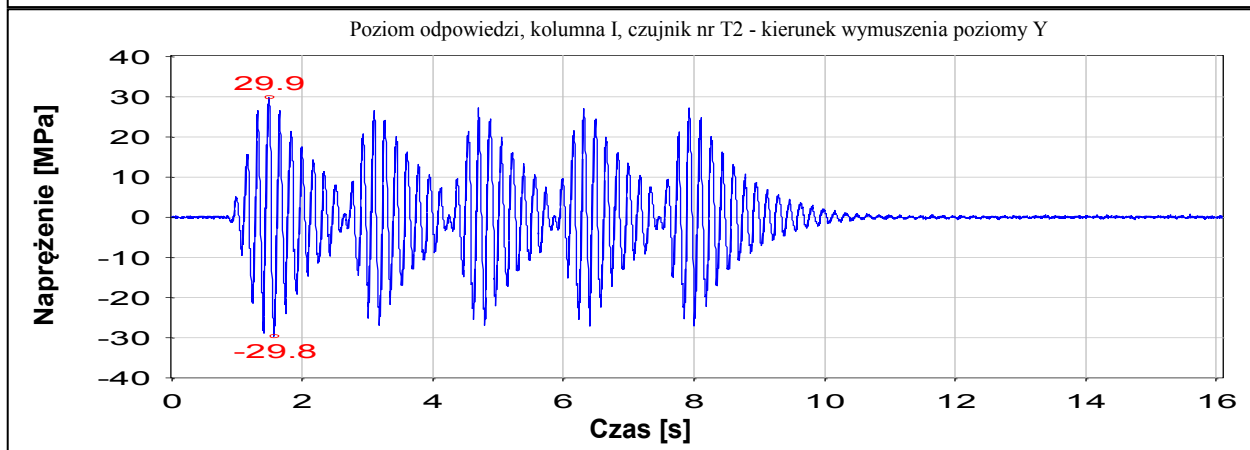
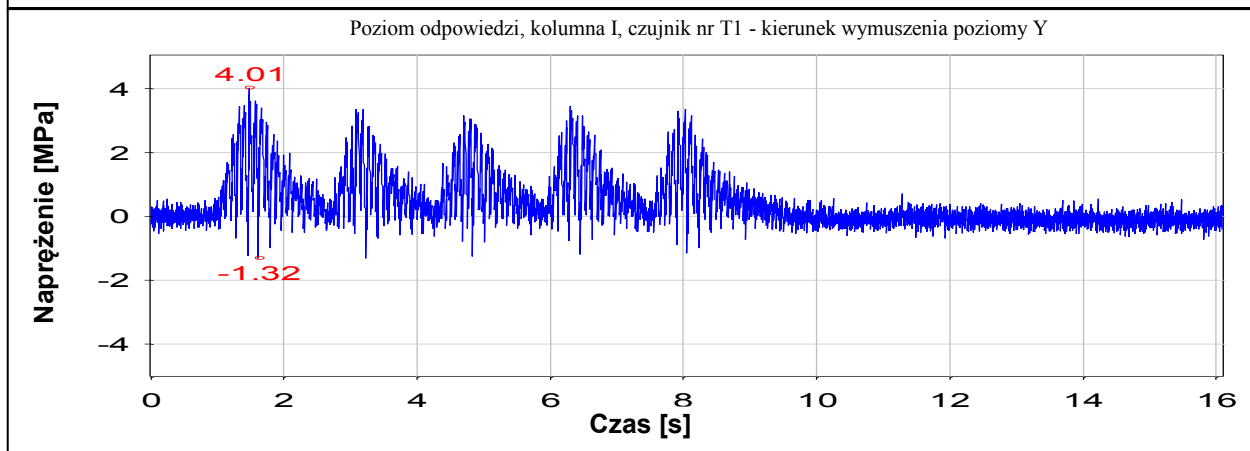
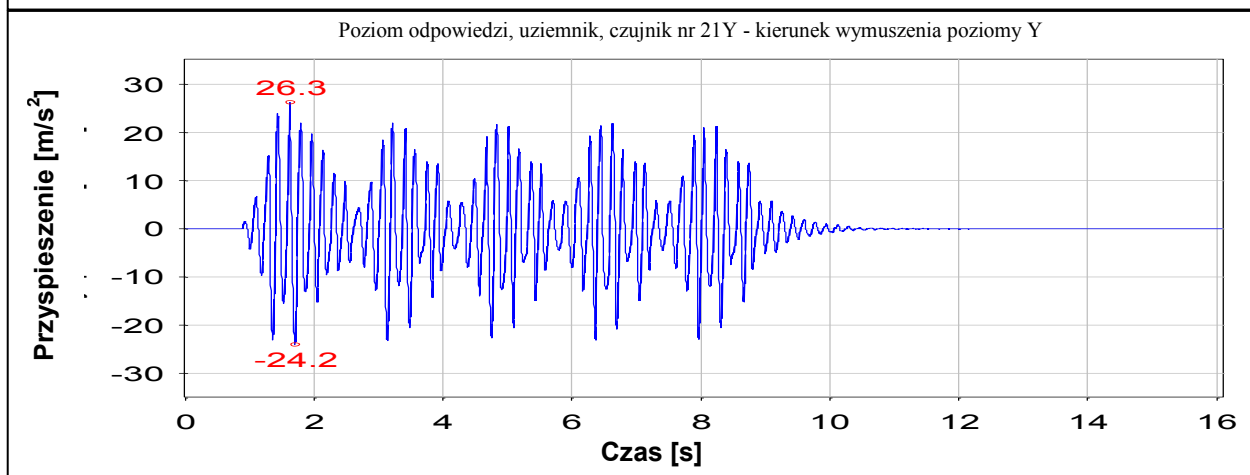
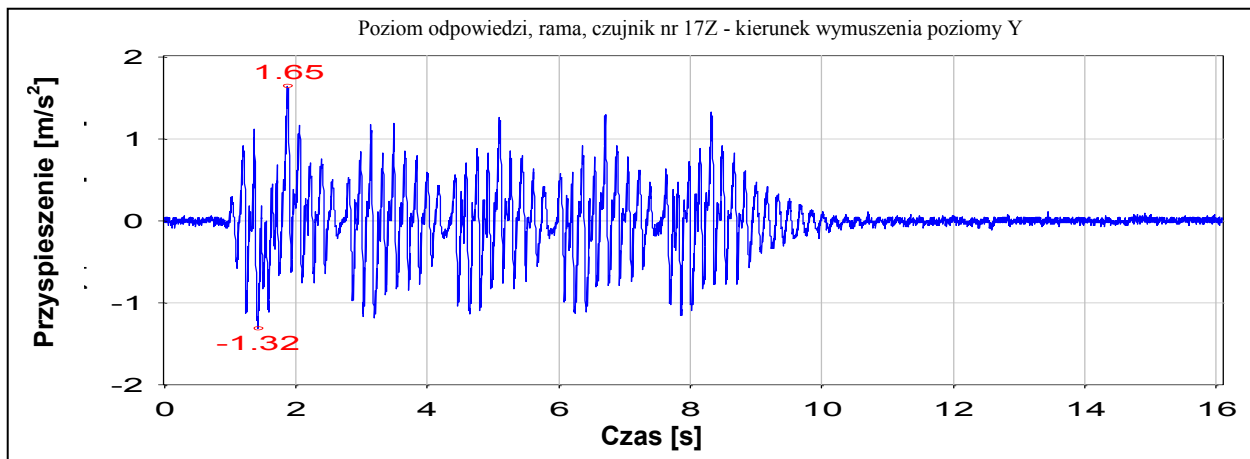


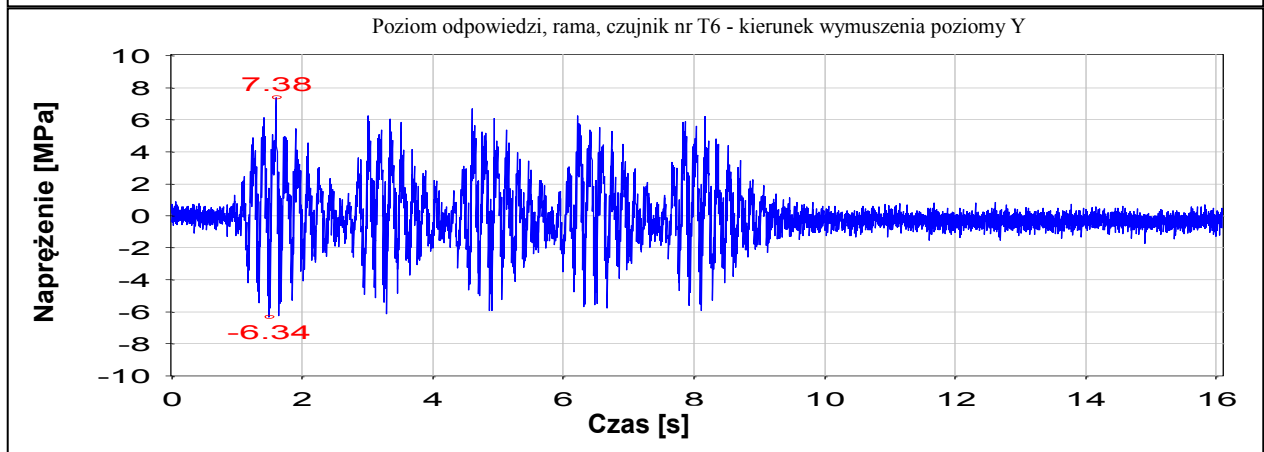
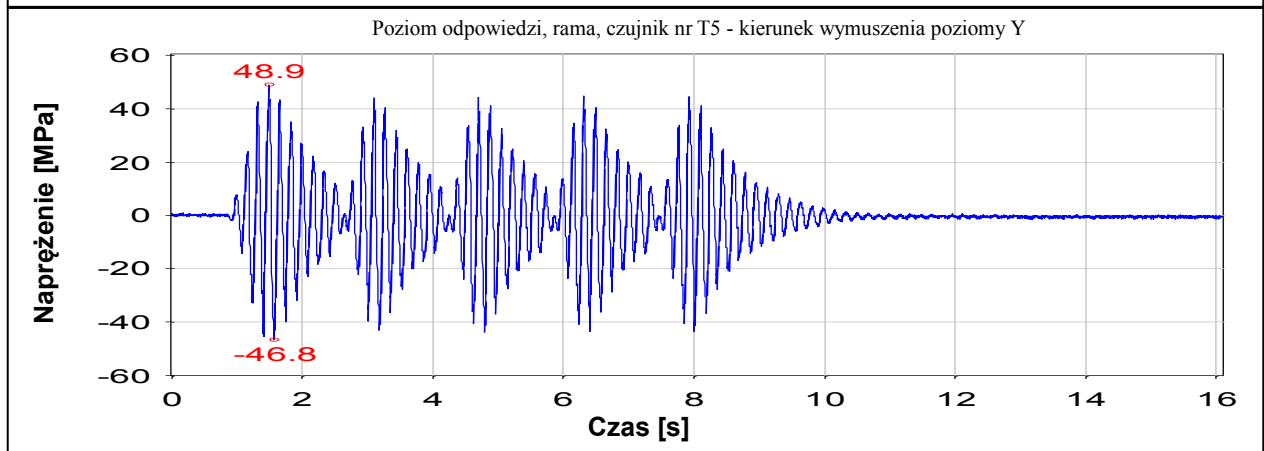
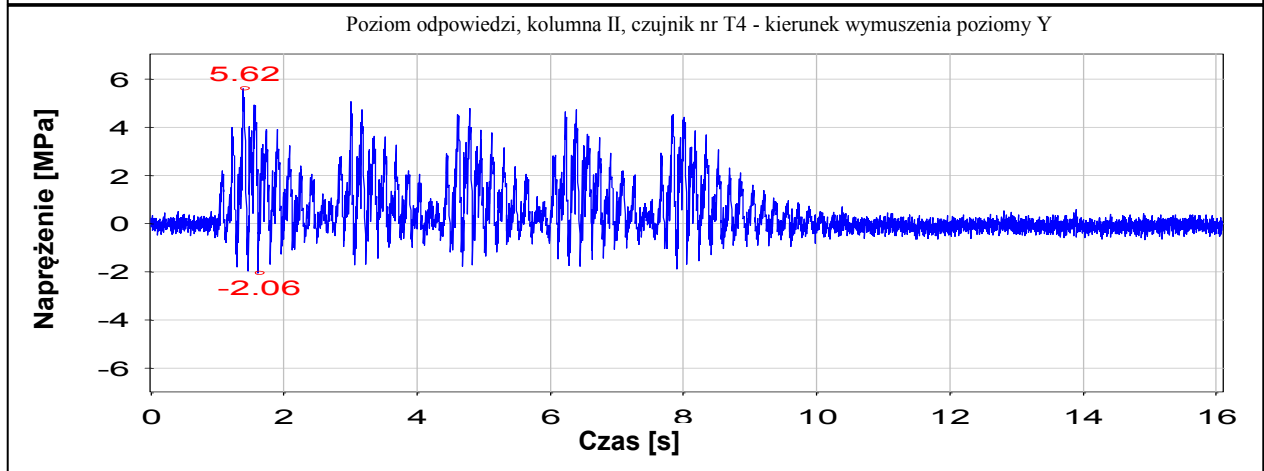
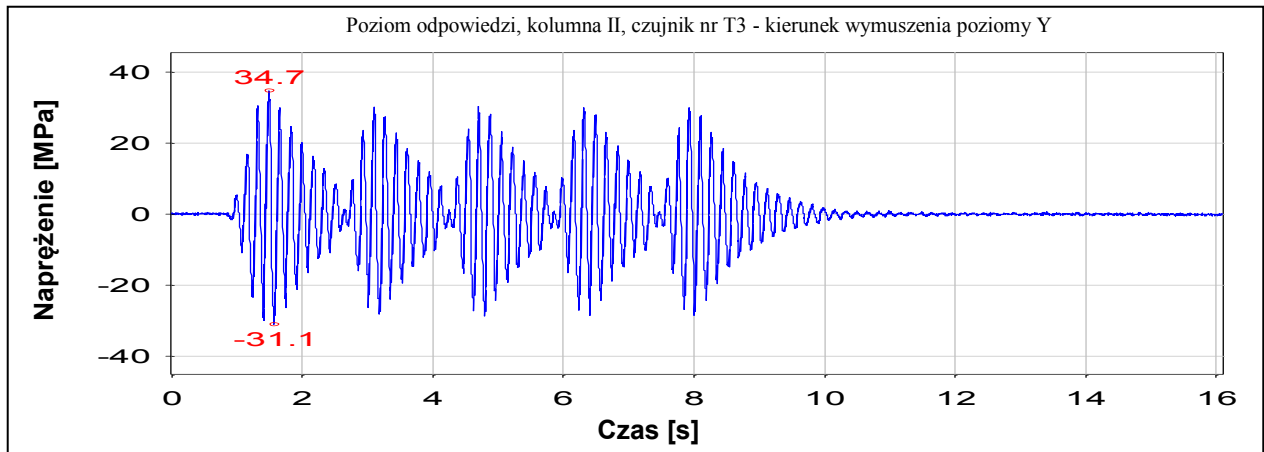
Rys. 3.93. Poziom zadany dla testu zniszczeniowego nr 3.

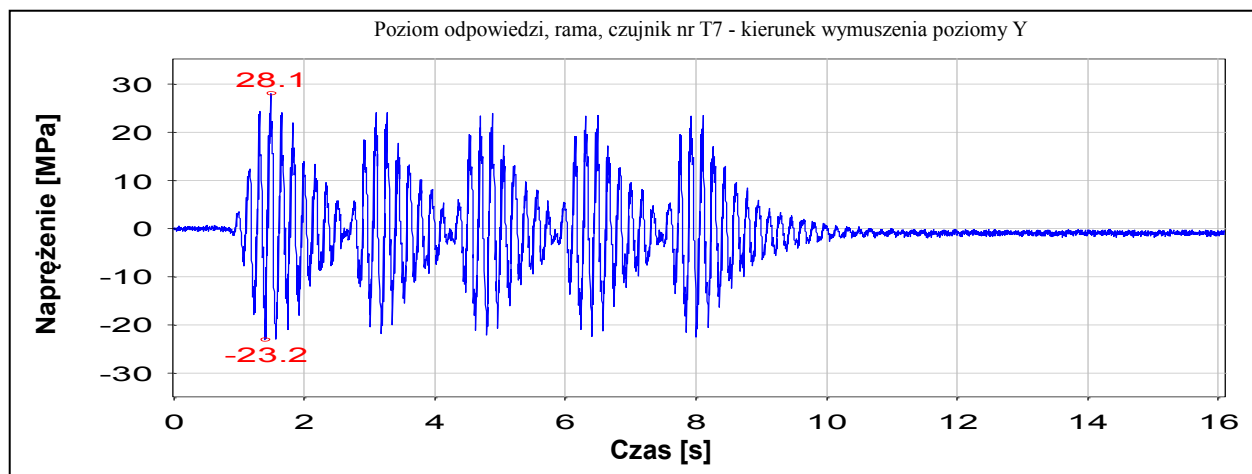
Rys. 3.94 prezentuje poziomy odpowiedzi konstrukcji odłącznika w postaci wykresów przebiegu przyspieszeń oraz naprężeń w funkcji czasu w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 3.











Rys. 3.94. Poziomy odpowiedzi dla testu zniszczeniowego nr 3.

3.5.3.3 Test zniszczeniowy nr 5, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty

Tabela 3.71 prezentuje zestawienie wartości ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz wartości ekstremalnych przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 5.

Punkt pomiarowy	Wartość przyspieszenia		Wartość przemieszczenia	
	Max m/s ²	Min m/s ²	Max mm	Min mm
Platforma stołu 22Y	15,00	-18,60	9,91	-11,30
Kolumna I 6Y	79,70	-79,70		
Kolumna II 10Y	114,00	-116,00		
Tor prądowy 8Y	142,00	-141,00		
Tor prądowy 8Z	5,20	-6,01		
Tor prądowy 9Y	134,00	-135,00		
Tor prądowy 9Z	4,07	-4,94		
Rama 17Y	16,00	-14,80		
Rama 17Z	2,10	-2,07		
Uziemnik 21Y	30,80	-29,10		

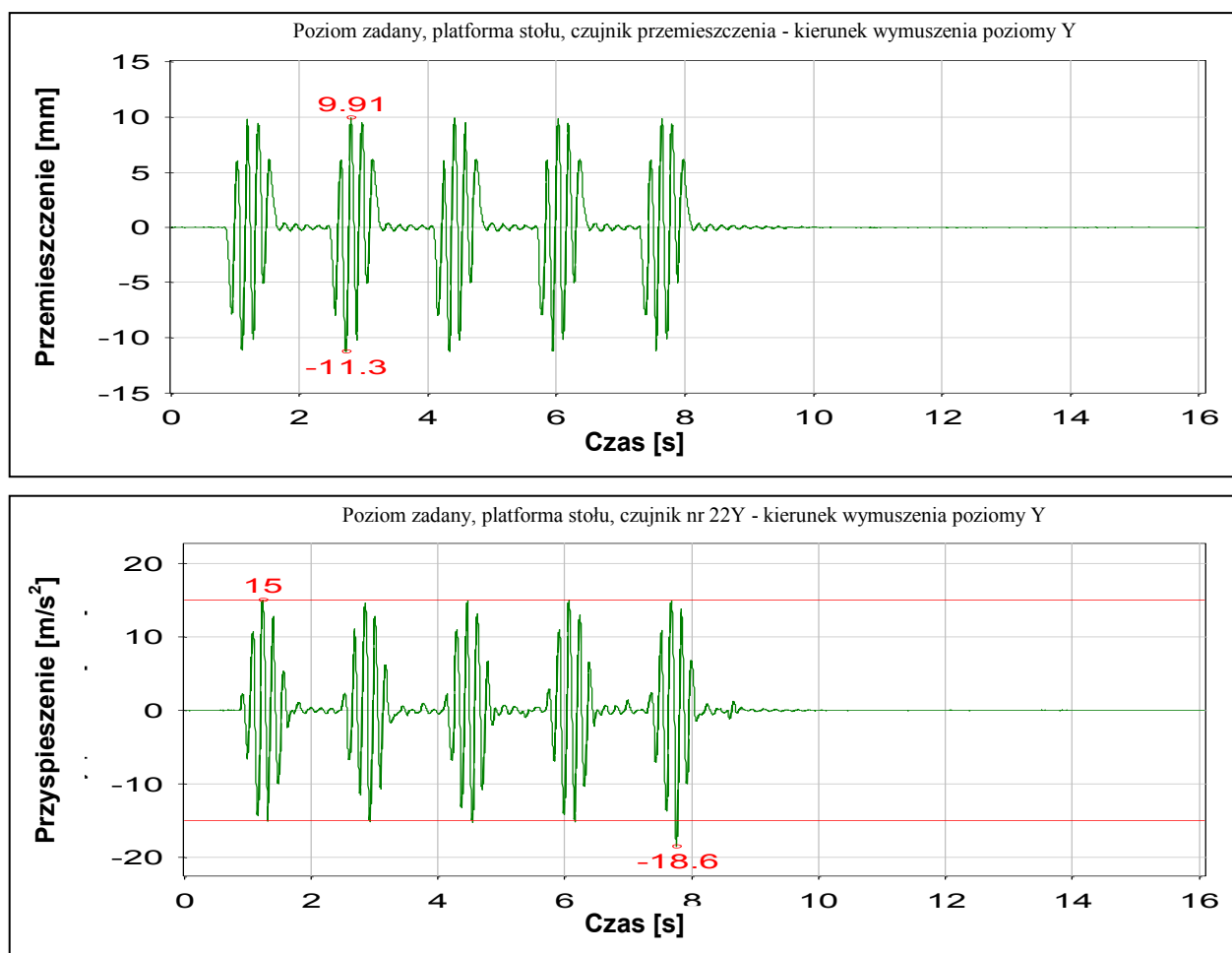
Tabela 3.71. Zestawienie ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 5.

W Tabeli 3.72 przedstawiono zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 5.

Punkt pomiarowy		Naprężenia	
		max	min
		MPa	MPa
Kolumna I	T1	7,45	-2,19
Kolumna I	T2	39,90	-42,20
Kolumna II	T3	44,10	-43,40
Kolumna II	T4	7,44	-2,87
Rama	T5	61,10	-69,80
Rama	T6	11,70	-6,60
Rama	T7	32,30	-35,60

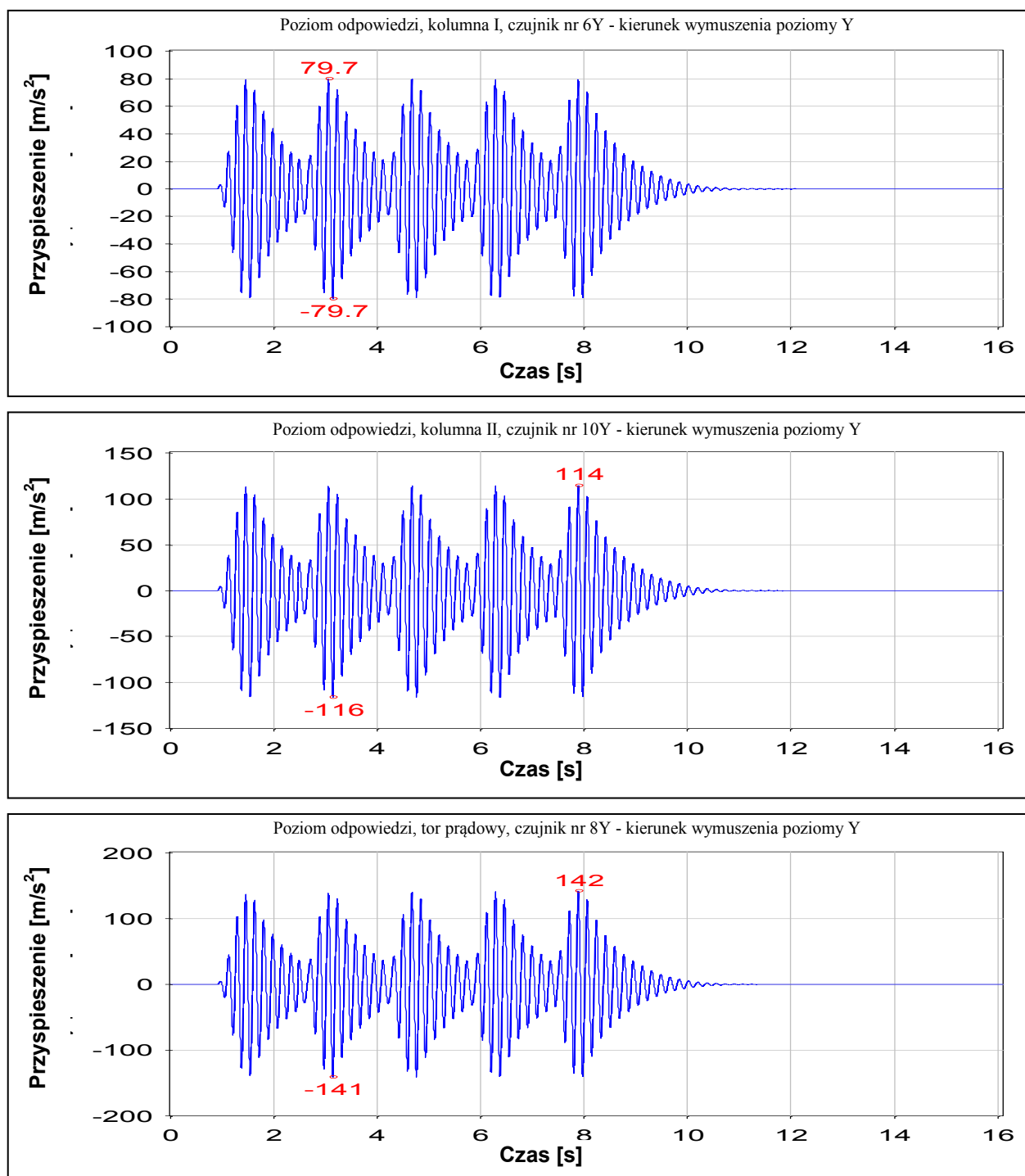
Tabela 3.72. Zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 5.

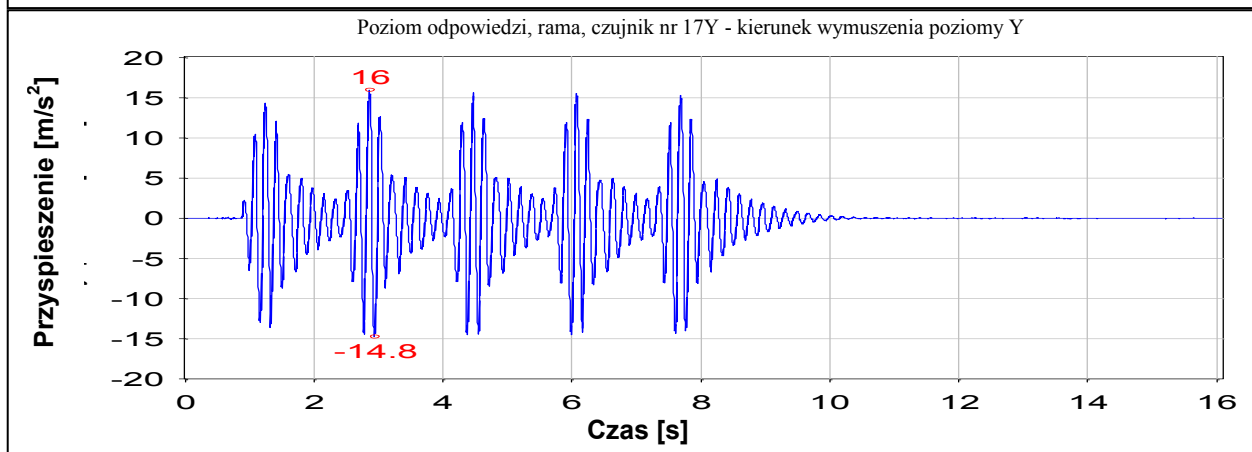
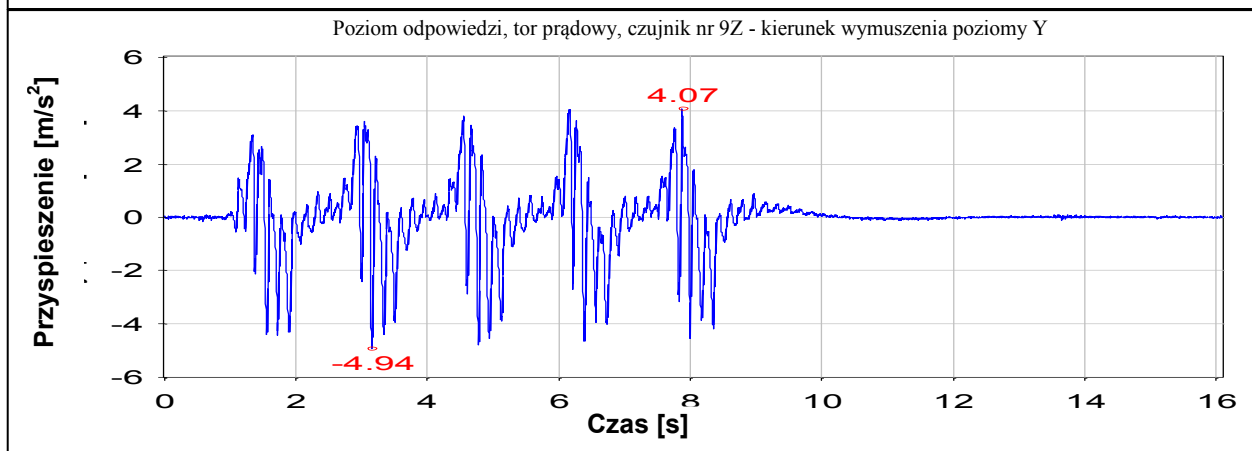
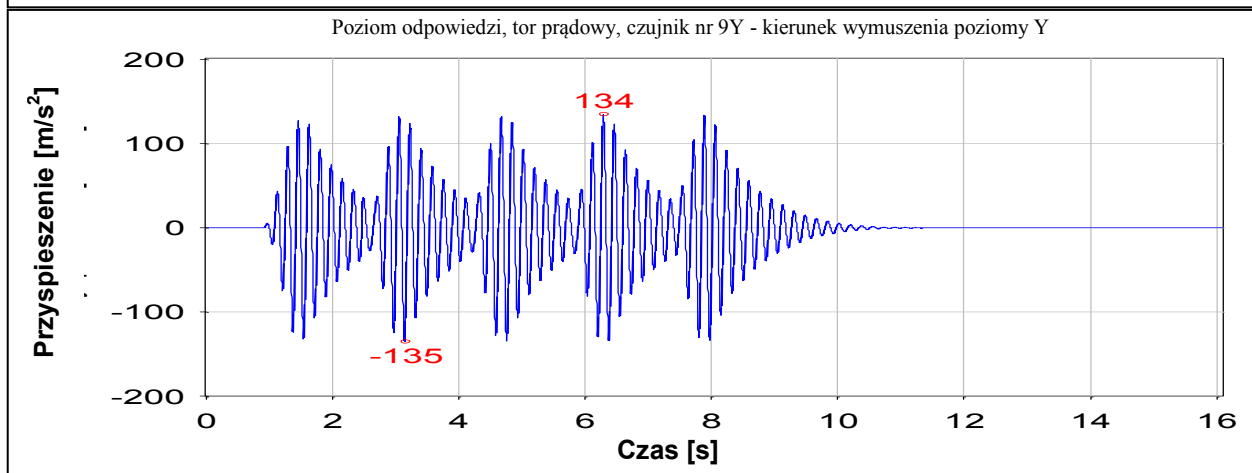
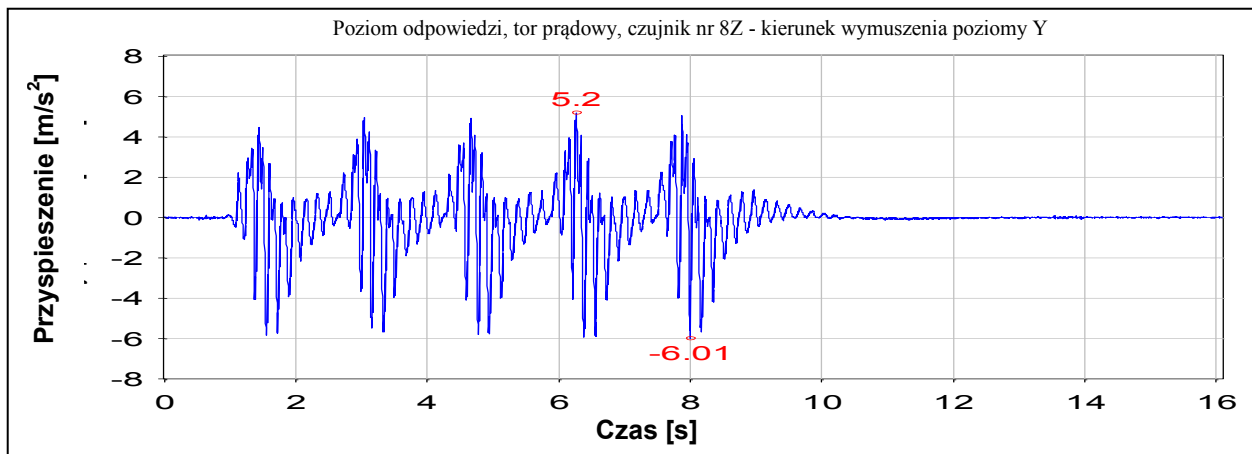
Na Rys. 3.95 przedstawiono wykresy wymuszenia dla testu zniszczeniowego nr 5 w postaci przebiegu przemieszczenia oraz przyspieszenia w funkcji czasu dla platformy stołu wstrząsowego (na wykresach zaznaczono wartości ekstremalne).

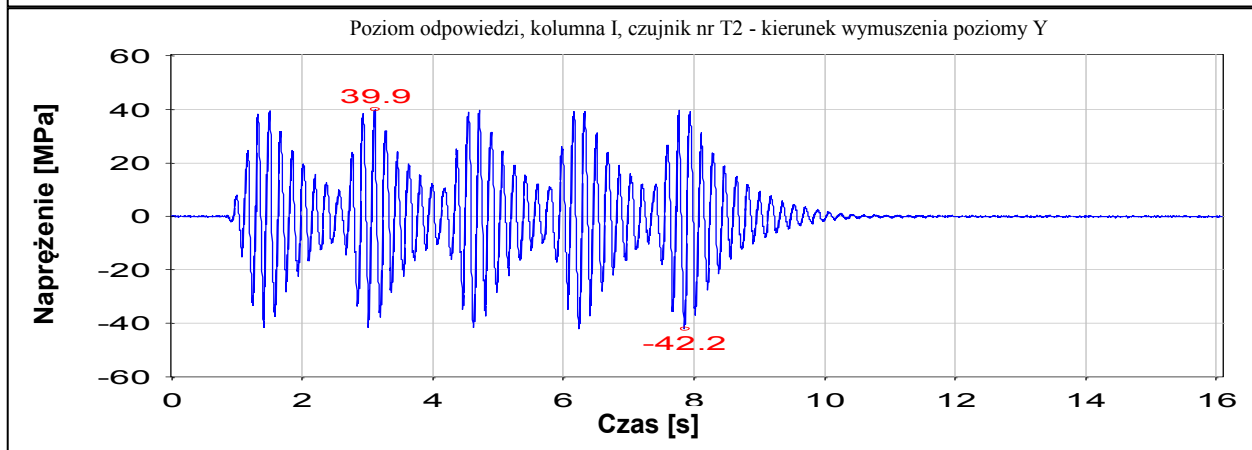
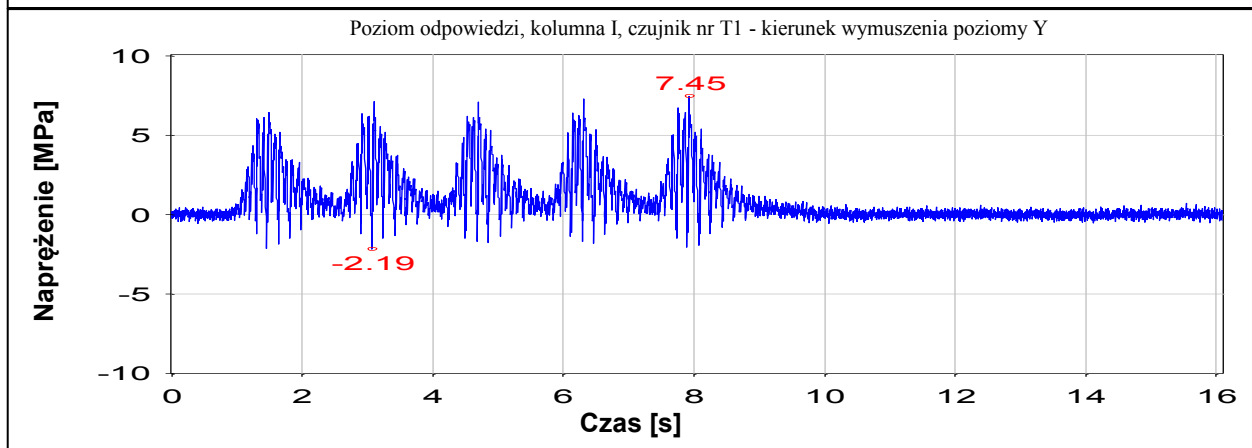
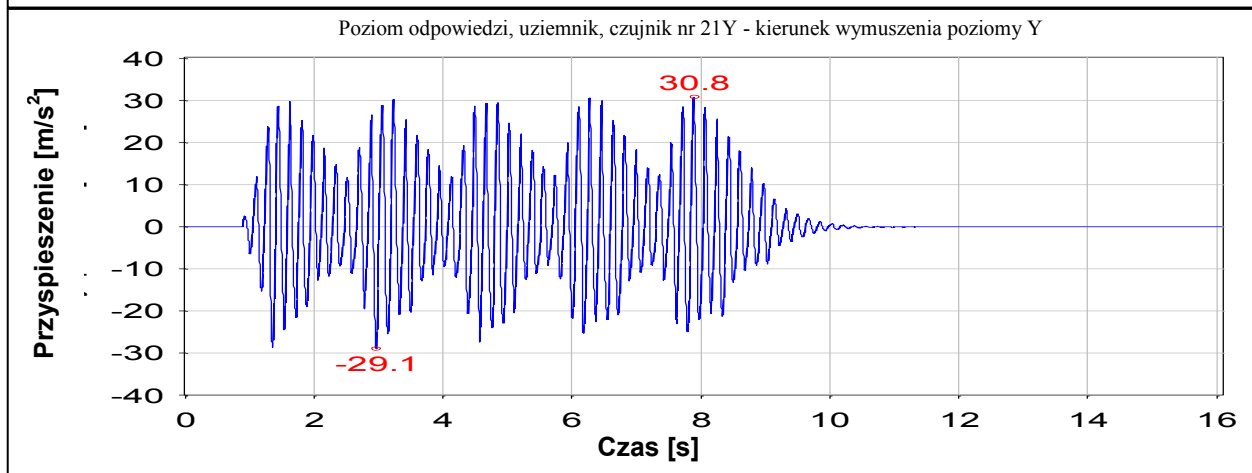
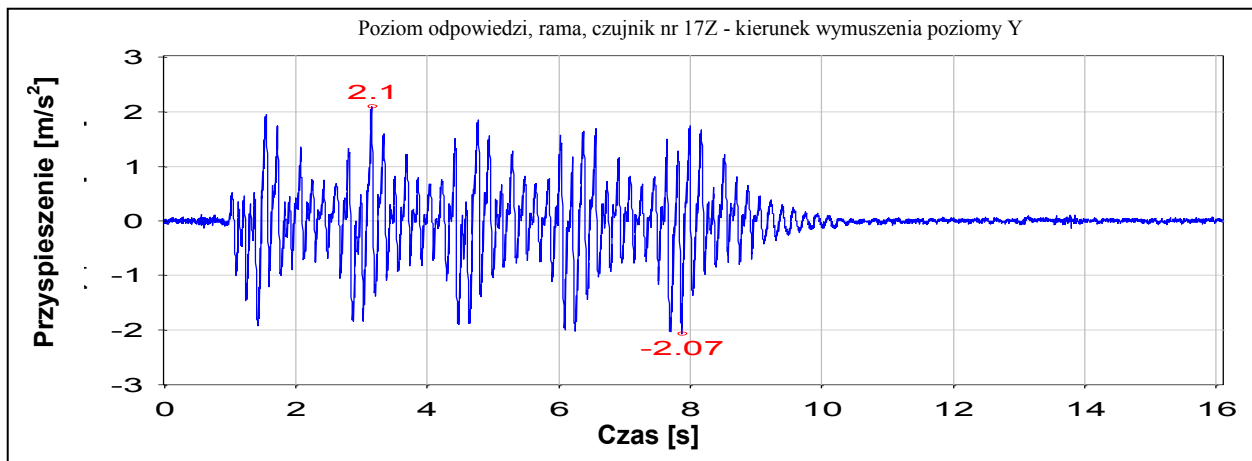


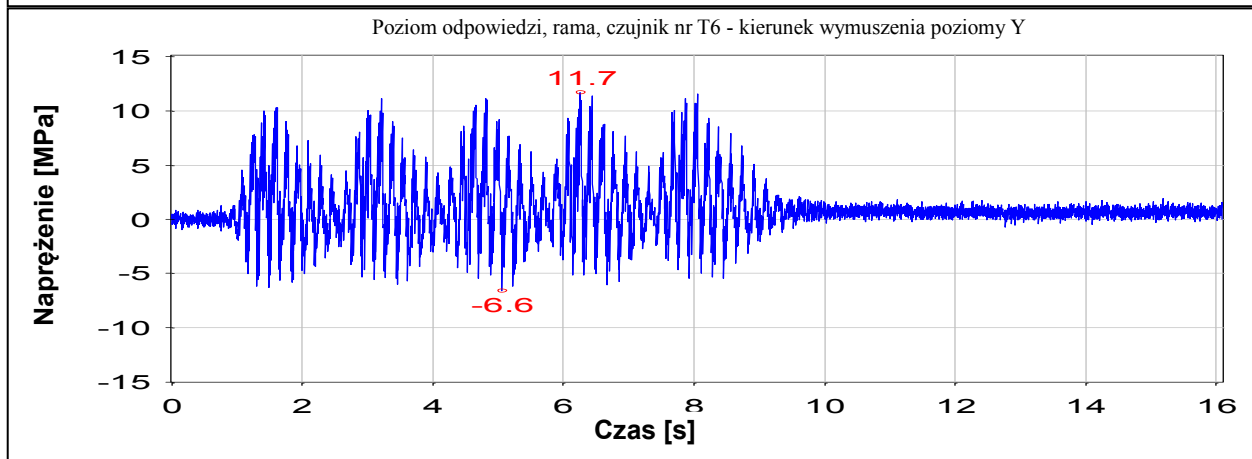
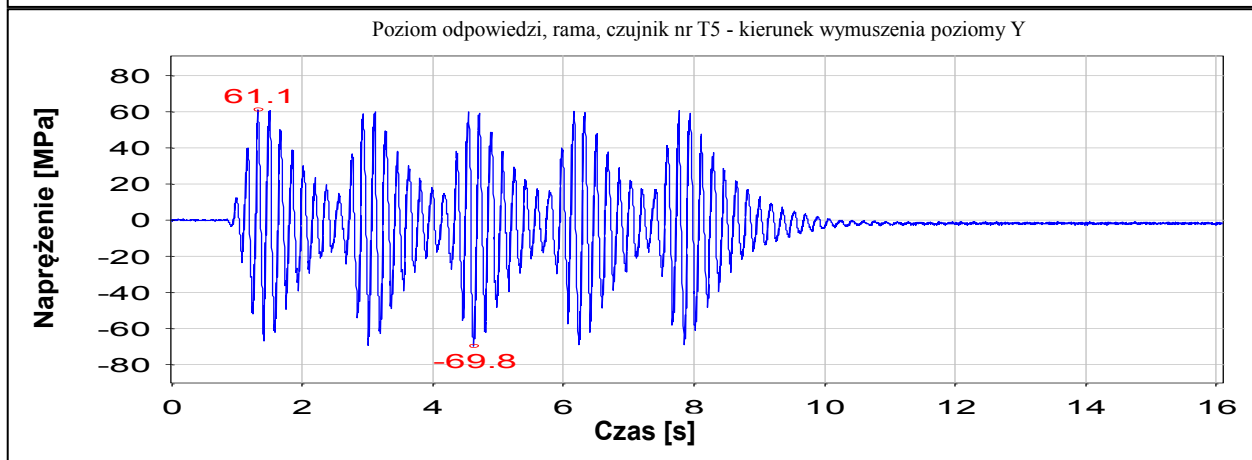
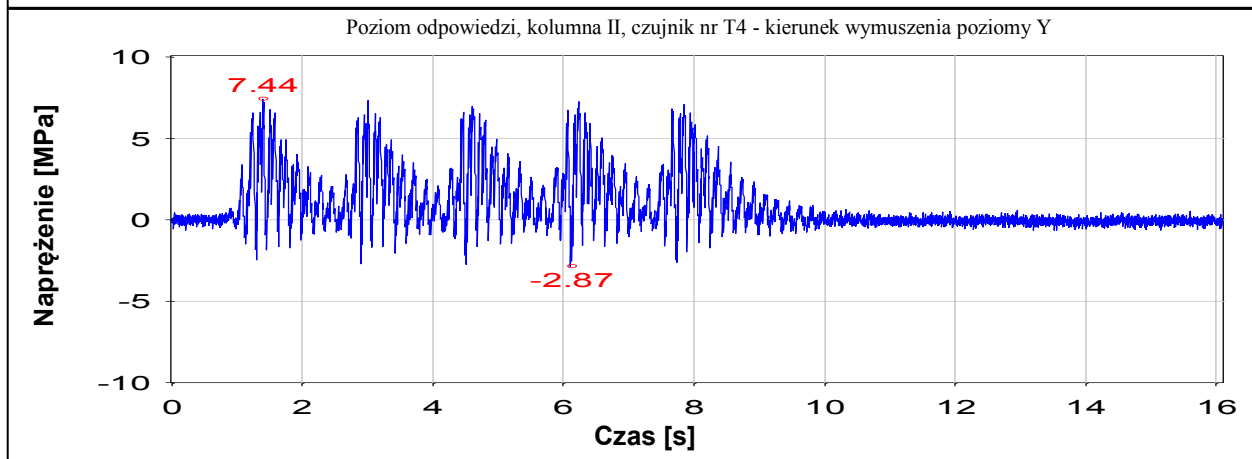
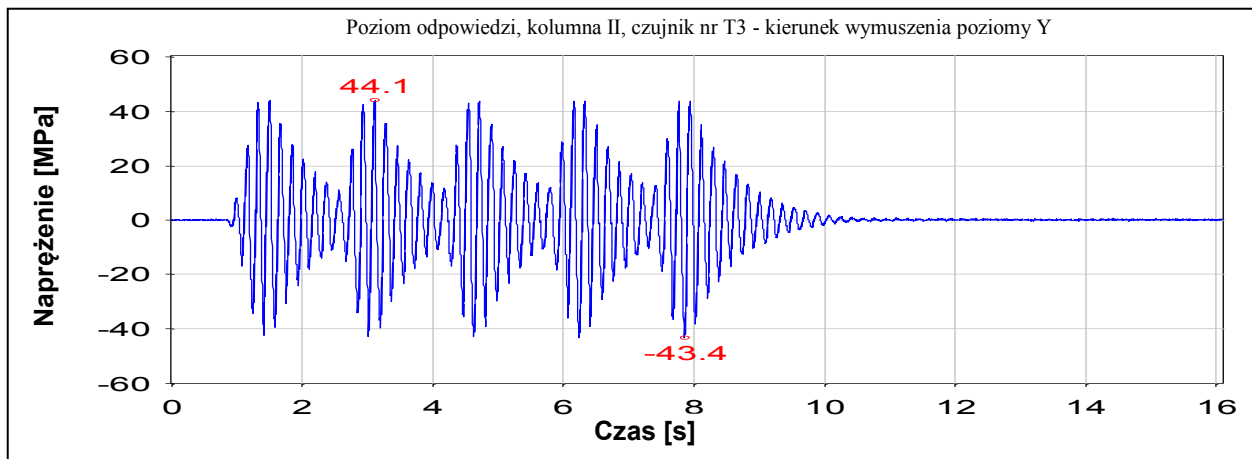
Rys. 3.95. Poziom zadany dla testu zniszczeniowego nr 5.

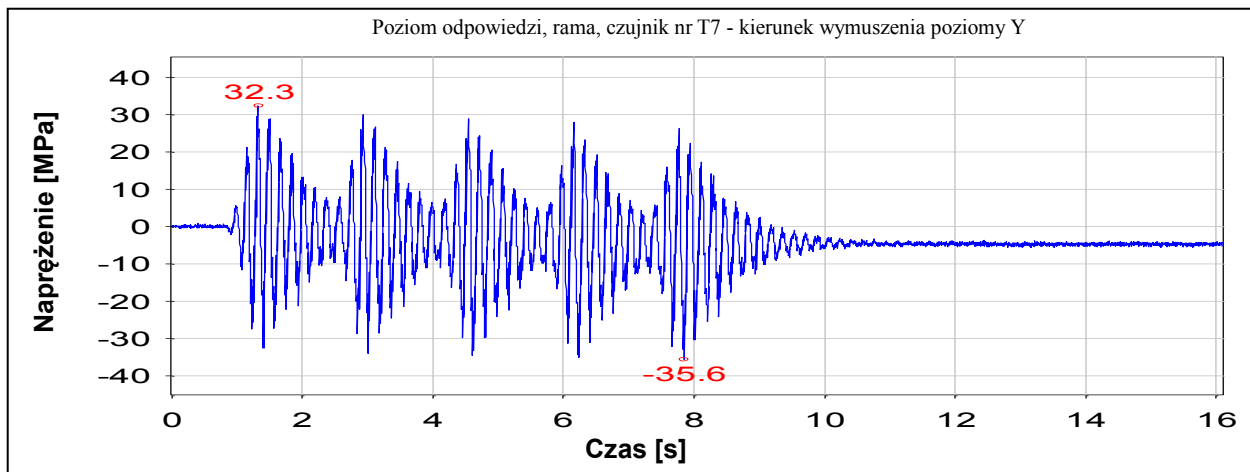
Rys. 3.96 prezentuje poziomy odpowiedzi konstrukcji odłącznika w postaci wykresów przebiegu przyspieszeń oraz naprężeń w funkcji czasu w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 5.











Rys. 3.96. Poziomy odpowiedzi dla testu zniszczeniowego nr 5.

3.5.3.4 Test zniszczeniowy nr 15, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty

Tabela 3.73 prezentuje zestawienie wartości ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz wartości ekstremalnych przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 15.

Punkt pomiarowy	Wartość przyspieszenia		Wartość przemieszczenia	
	max	min	max	min
	m/s ²	m/s ²	mm	mm
Platforma stołu 22Y	19,60	-21,50	9,56	-10,90
Kolumna I 6Y	114,00	-114,00		
Kolumna II 10Y	107,00	-115,00		
Tor prądowy 8Y	195,00	-211,00		
Tor prądowy 8Z	31,00	-46,20		
Tor prądowy 9Y	156,00	-173,00		
Tor prądowy 9Z	23,50	-29,80		
Rama 17Y	22,50	-23,00		
Rama 17Z	14,80	-15,70		
Uziemnik 21Y	52,50	-37,80		

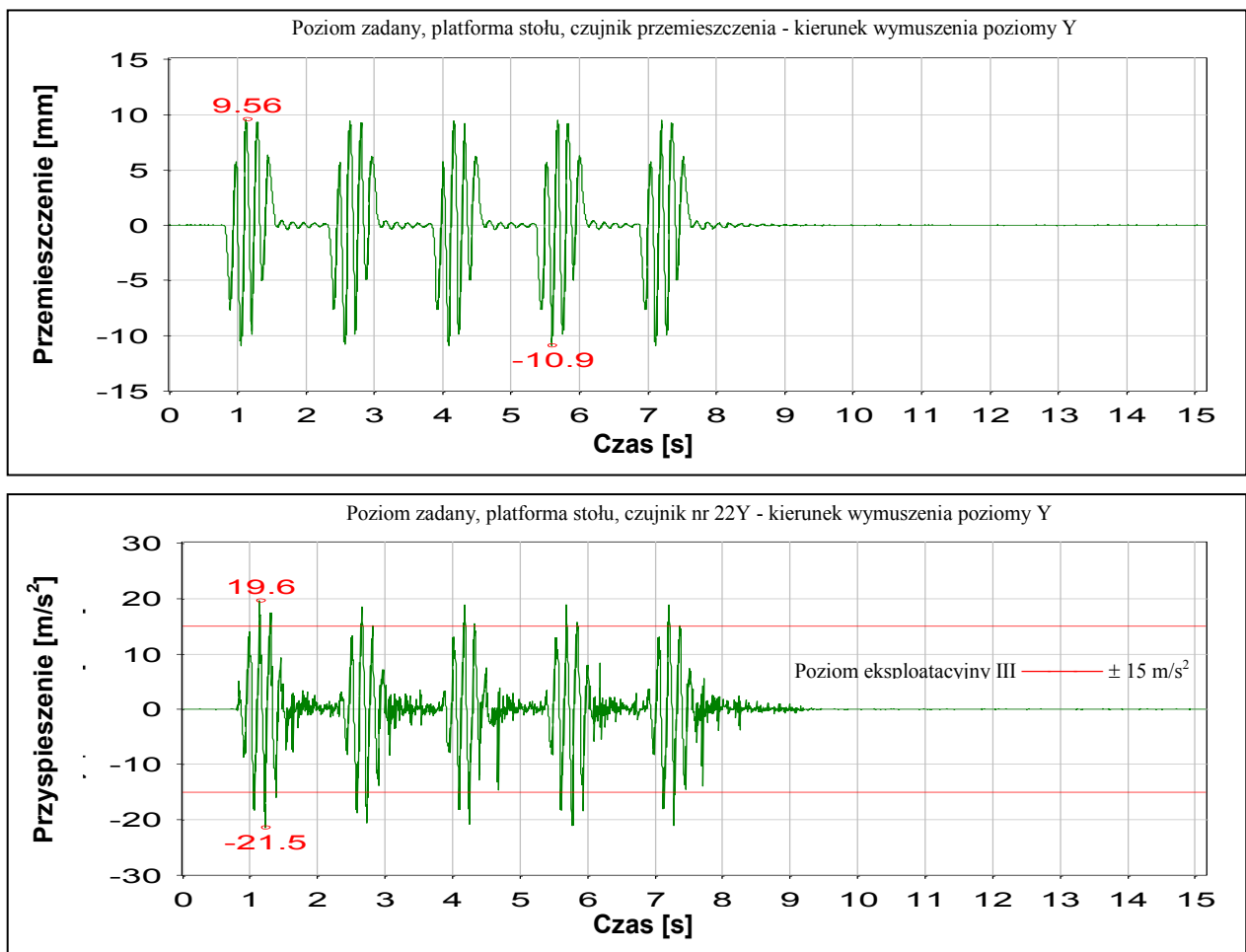
Tabela 3.73. Zestawienie ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 15.

W Tabeli 3.74 przedstawiono zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 15.

Punkt pomiarowy		Naprężenia	
		max	min
		MPa	MPa
Kolumna I	T1	5,87	-3,24
Kolumna I	T2	41,90	-41,90
Kolumna II	T3	58,70	-55,60
Kolumna II	T4	11,20	-2,79
Rama	T5	80,00	-73,00
Rama	T6	35,50	-29,00
Rama	T7	126,00	-119,00

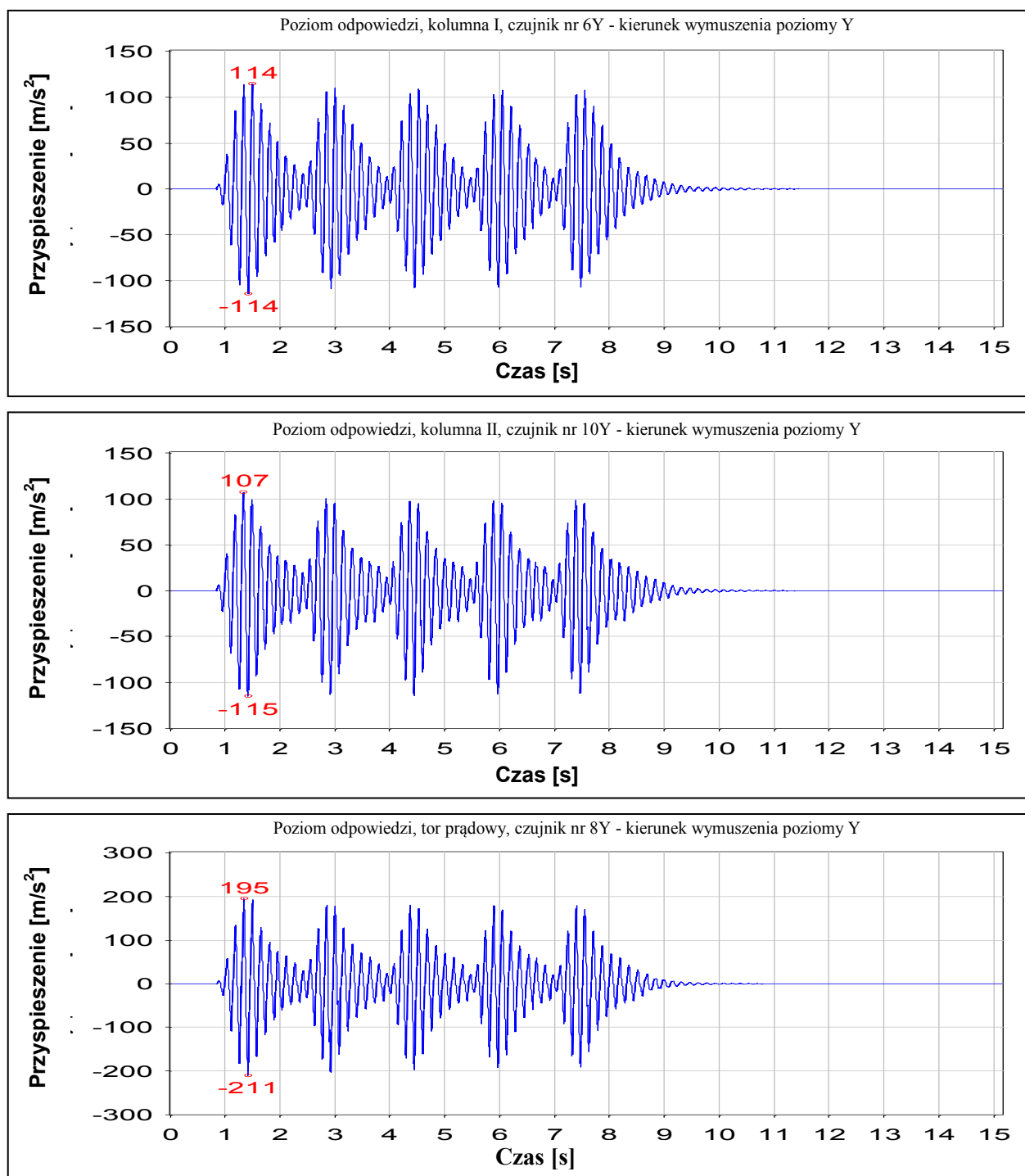
Tabela 3.74. Zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 15.

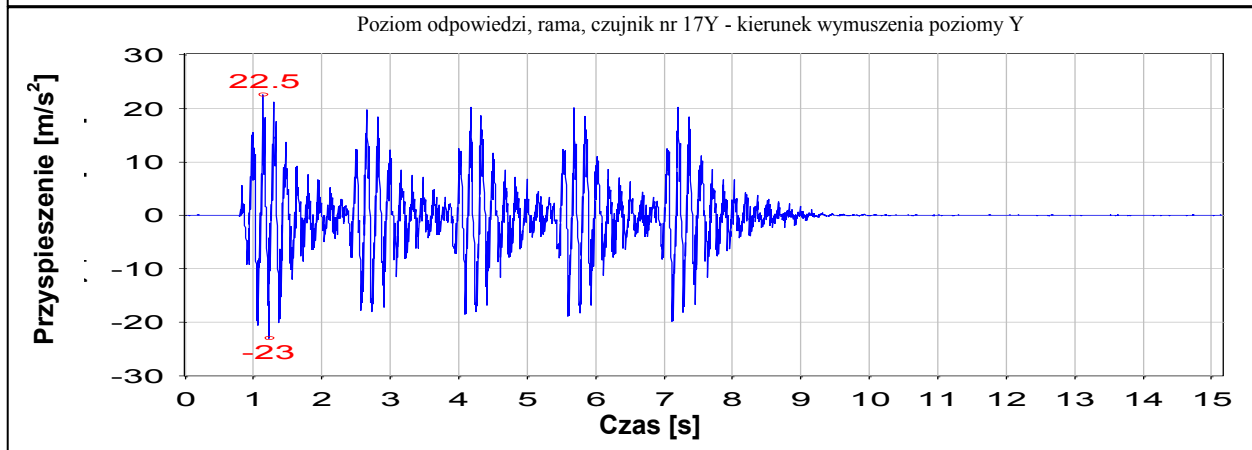
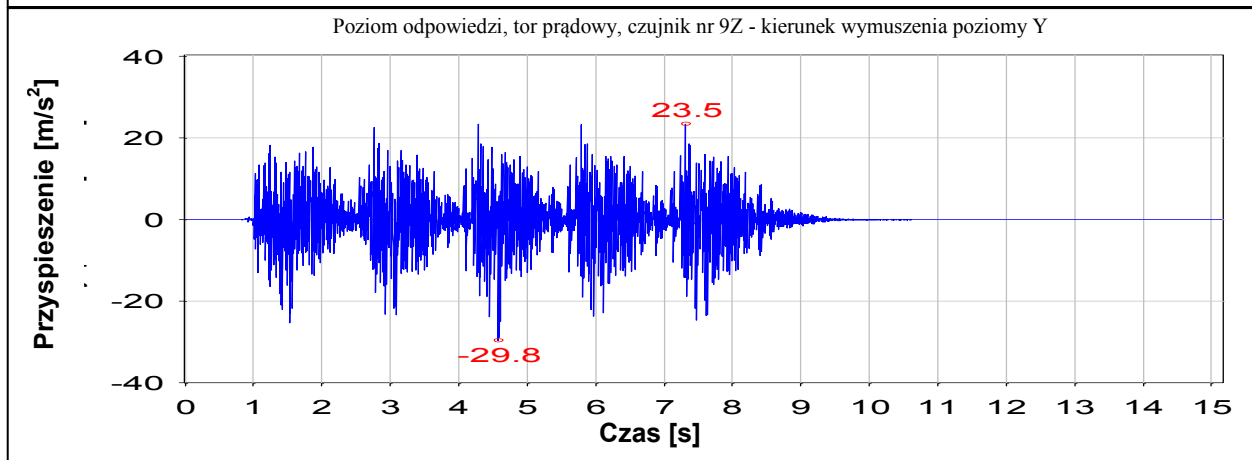
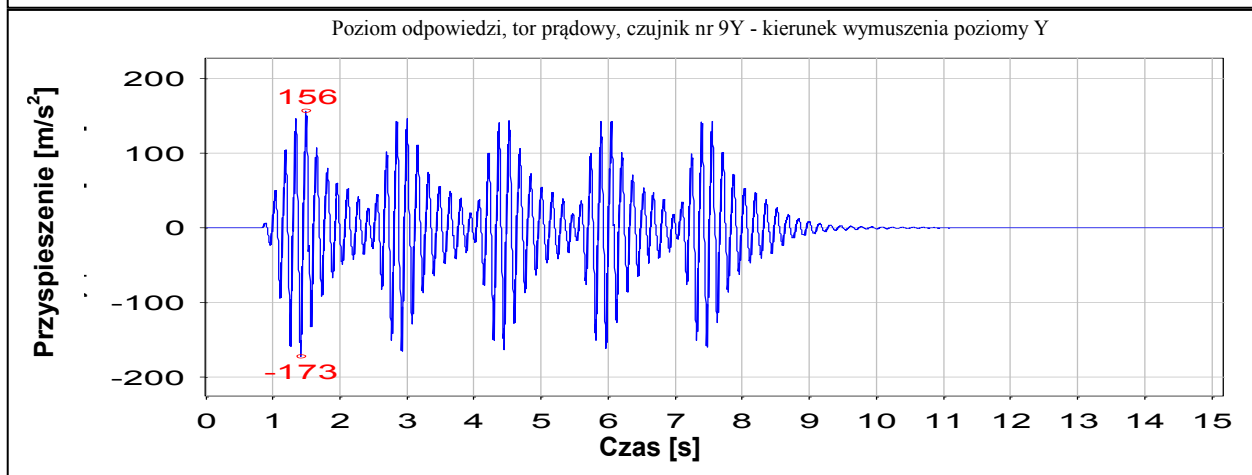
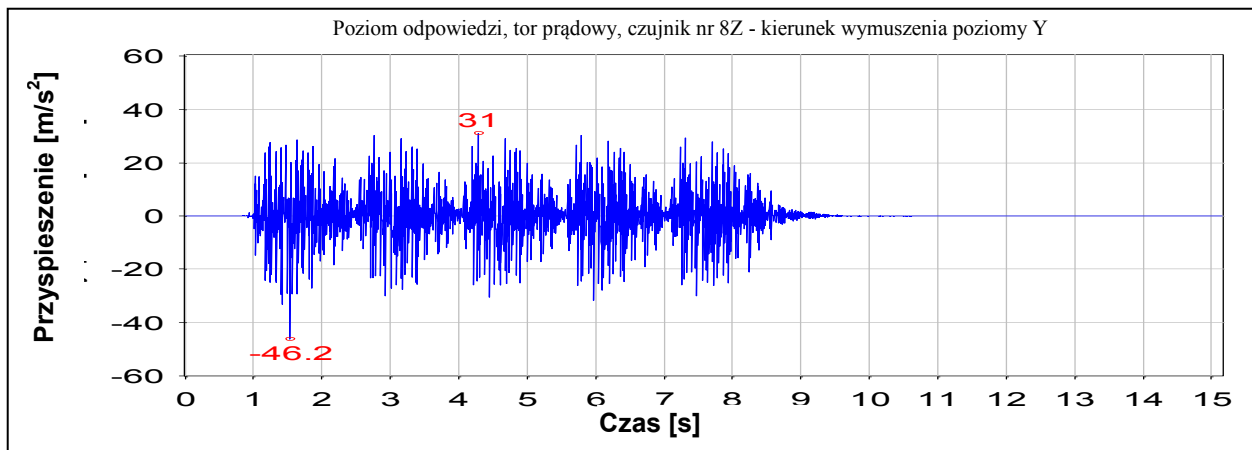
Na Rys. 3.97 przedstawiono wykresy wymuszenia dla testu zniszczeniowego nr 15 w postaci przebiegu przemieszczenia oraz przyspieszenia w funkcji czasu dla platformy stołu wstrząsowego (na wykresach zaznaczono wartości ekstremalne).

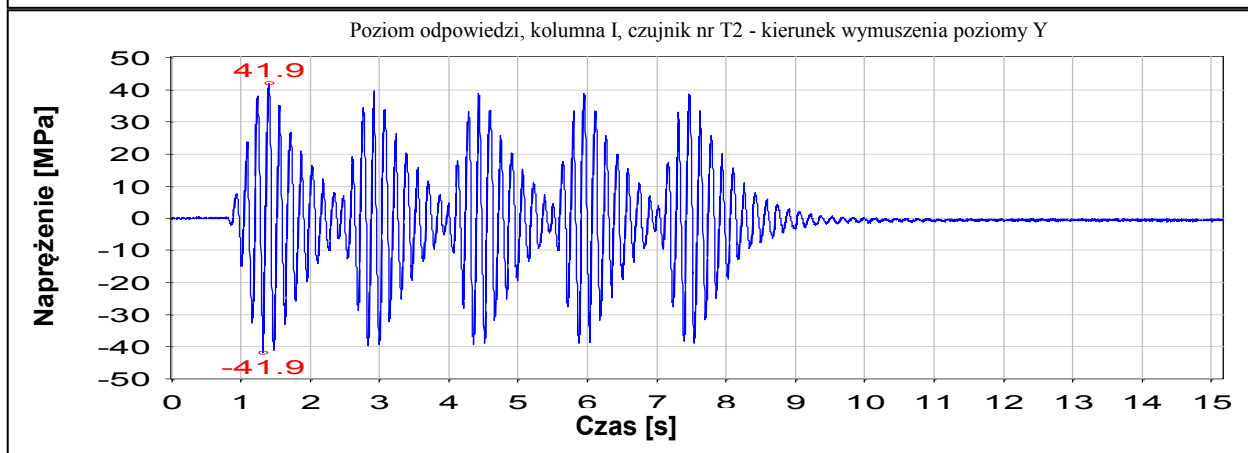
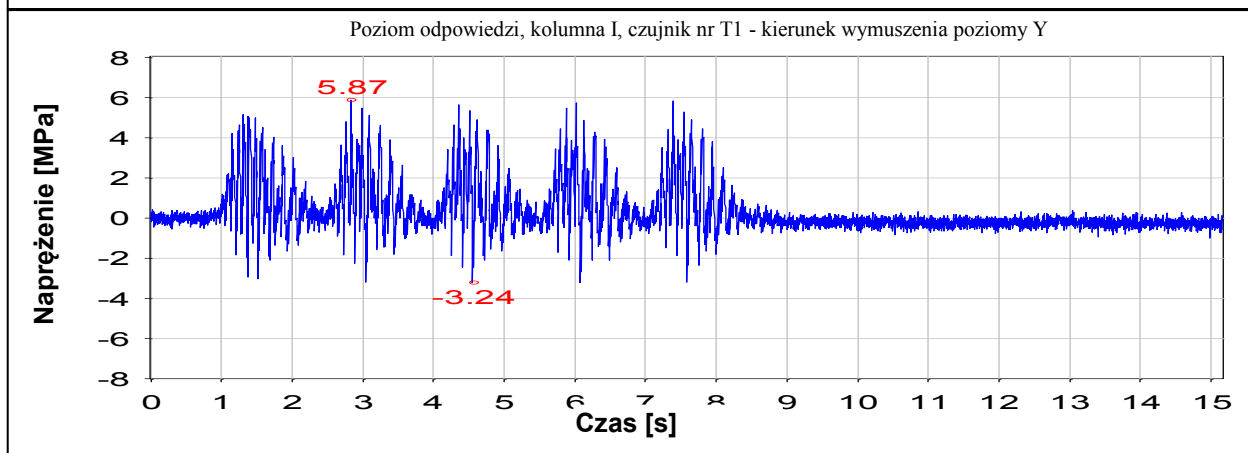
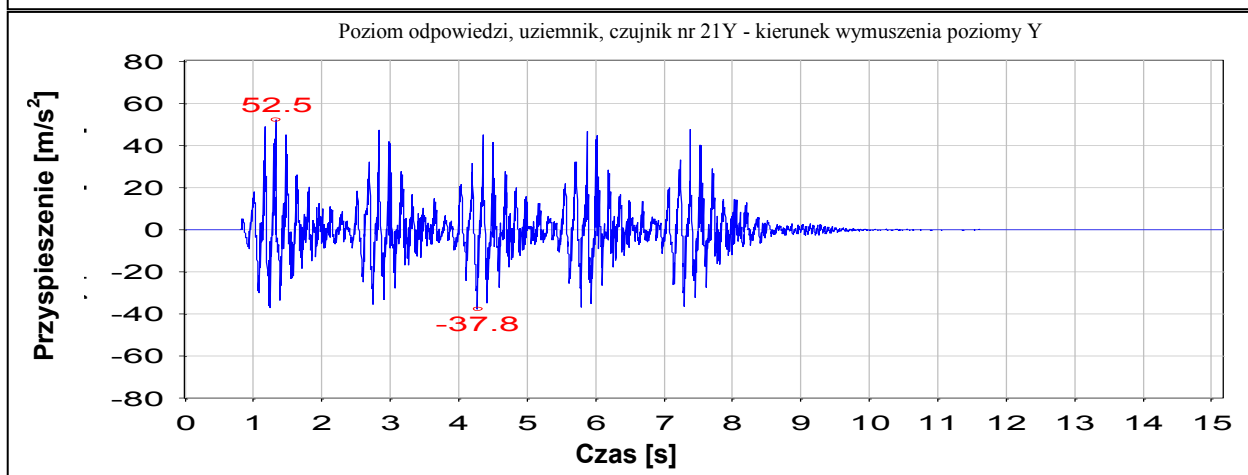


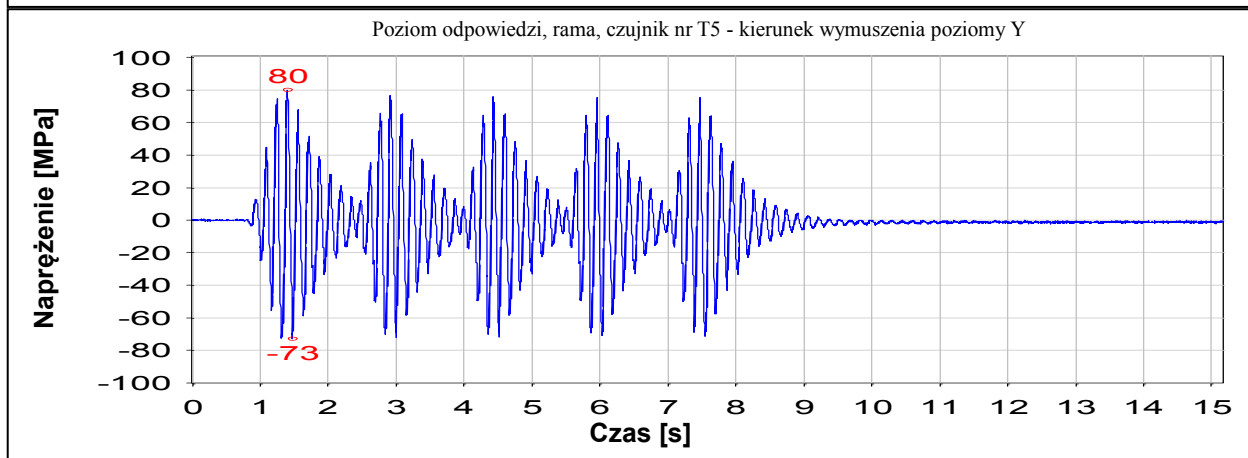
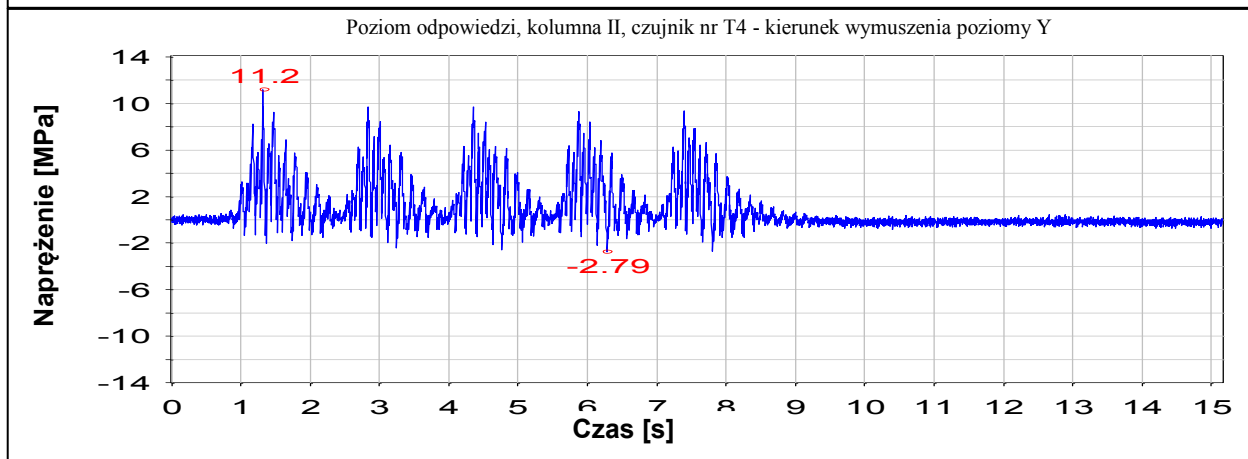
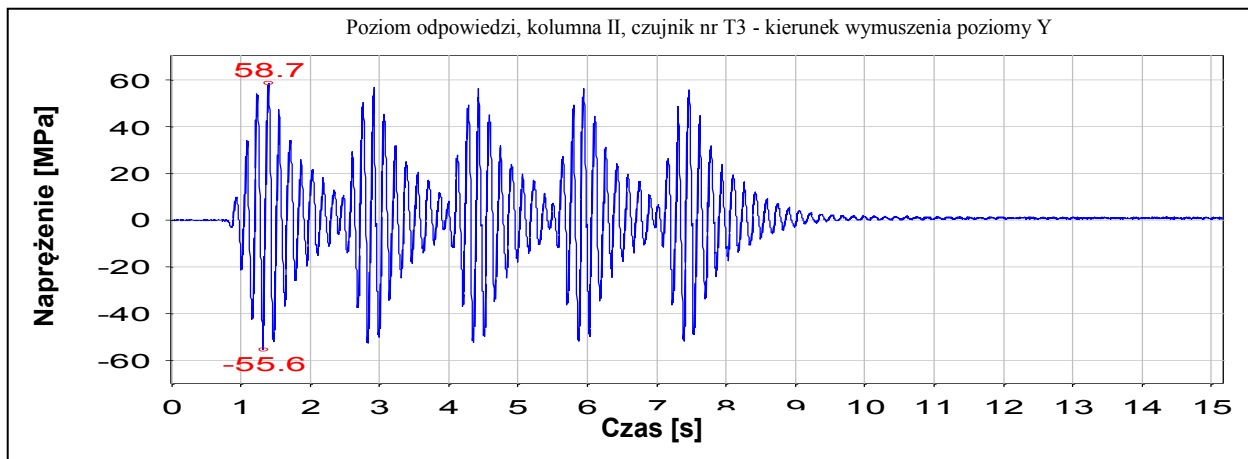
Rys. 3.97. Poziom zadany dla testu zniszczeniowego nr 15.

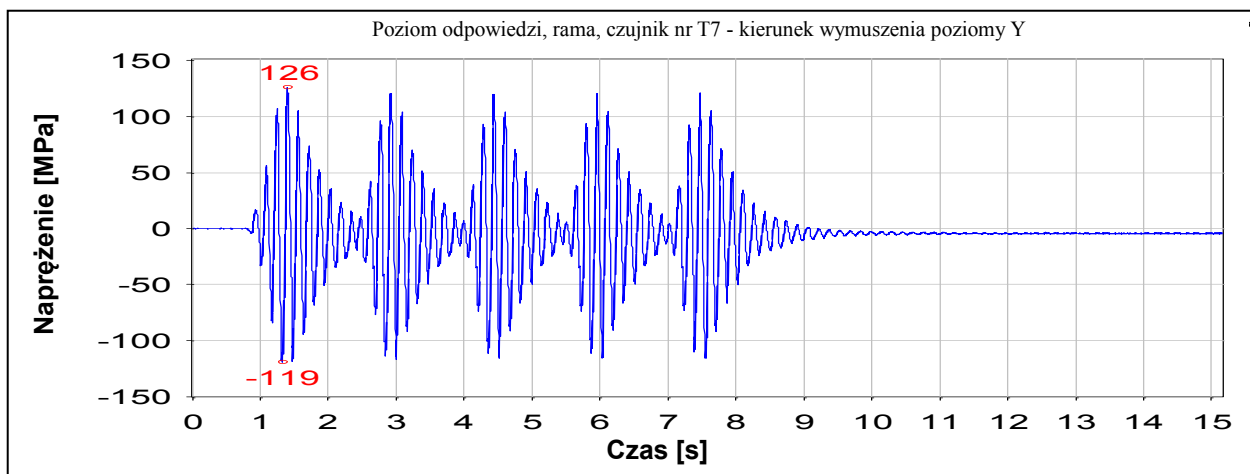
Rys. 3.98 prezentuje poziomy odpowiedzi konstrukcji odłącznika w postaci wykresów przebiegu przyspieszeń oraz naprężeń w funkcji czasu w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 15.











Rys. 3.98. Poziomy odpowiedzi dla testu zniszczeniowego nr 15.

3.5.3.5 Test zniszczeniowy nr 16, kierunek wymuszenia poziomy Y, odłącznik zamknięty

Tabela 3.75 prezentuje zestawienie wartości ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz wartości ekstremalnych przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 16.

Punkt pomiarowy	Wartość przyspieszenia		Wartość przemieszczenia	
	max	min	max	min
	m/s ²	m/s ²	mm	mm
Platforma stołu 22Y	31,40	-33,80	15,30	-16,40
Kolumna I 6Y	133,00	-130,00		
Kolumna II 10Y	140,00	-482,00		
Tor prądowy 8Y	257,00	-480,00		
Tor prądowy 8Z	60,80	-313,00		
Tor prądowy 9Y	193,00	-490,00		
Tor prądowy 9Z	86,60	-483,00		
Rama 17Y	487,00	-102,00		
Rama 17Z	81,70	-327,00		
Uziemnik 21Y	108,00	-352,00		

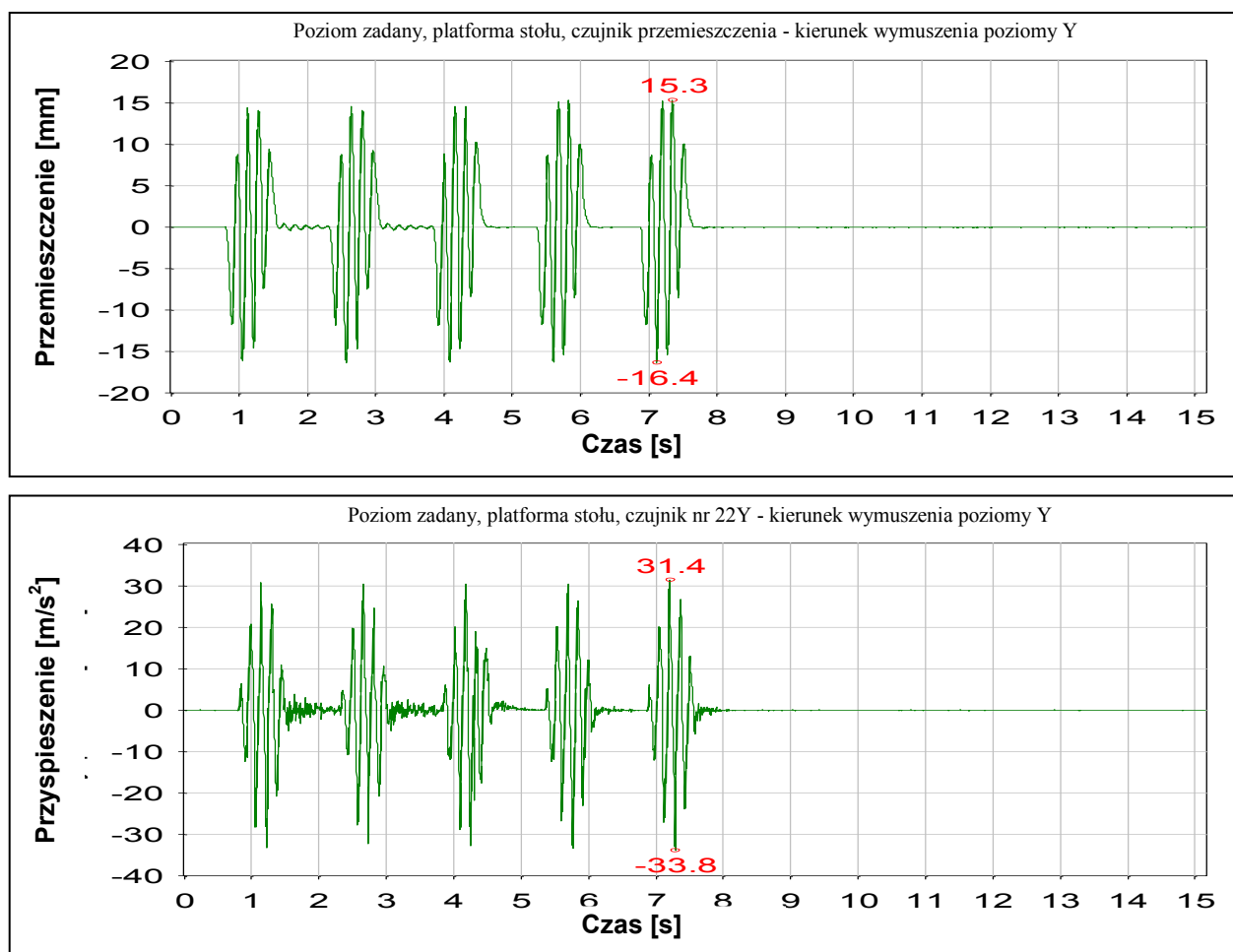
Tabela 3.75. Zestawienie ekstremalnych przyspieszeń w różnych punktach pomiarowych oraz przemieszczeń platformy stołu dla testu zniszczeniowego nr 16.

W Tabeli 3.76 przedstawiono zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 16.

Punkt pomiarowy		Naprężenia	
		max	min
		MPa	MPa
Kolumna I	T1	13,90	-13,80
Kolumna I	T2	48,70	-48,50
Kolumna II	T3	68,60	-71,50
Kolumna II	T4	14,10	-7,52
Rama	T5	110,00	-85,80
Rama	T6	59,30	-47,30
Rama	T7	189,00	-160,00

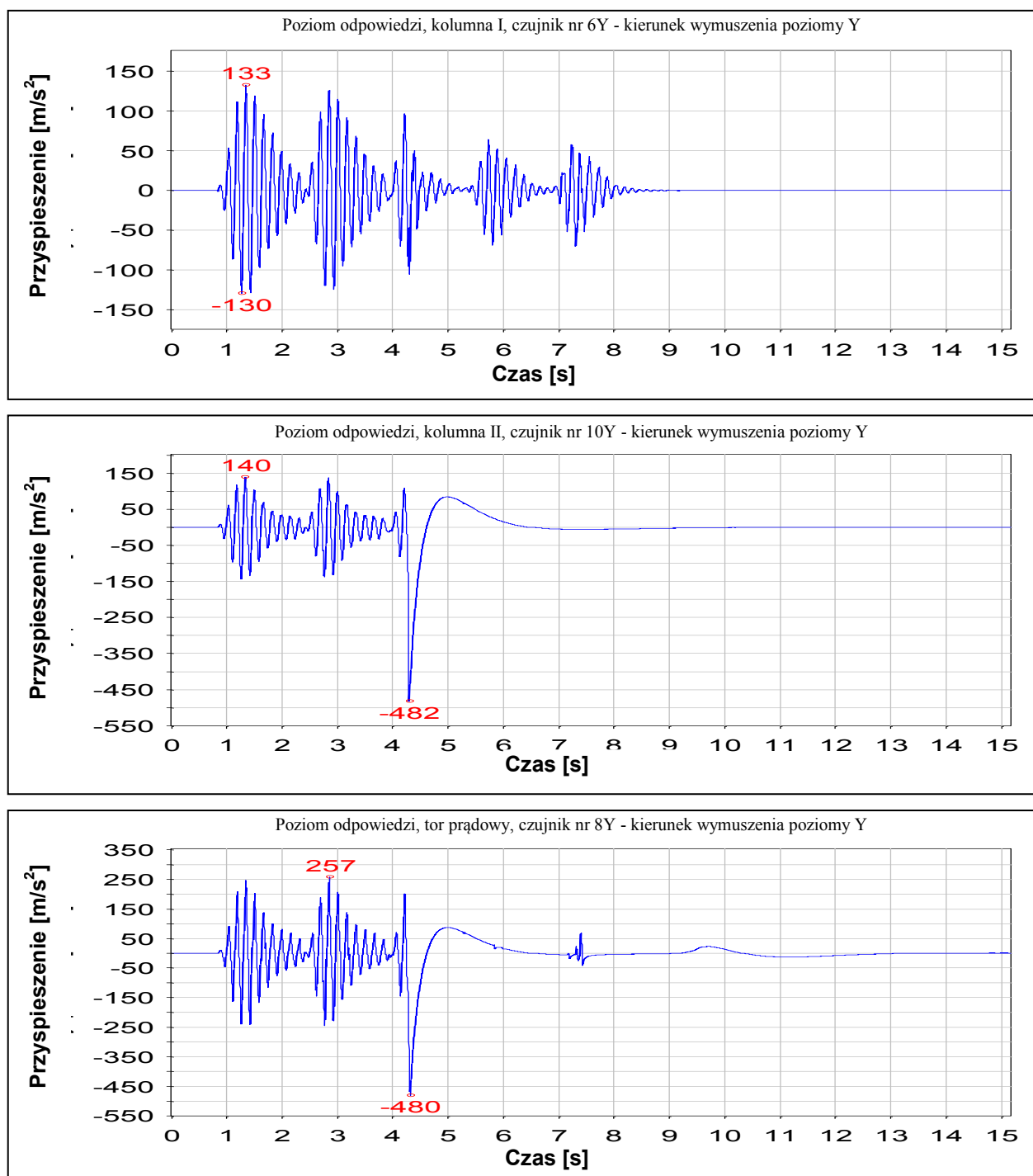
Tabela 3.76. Zestawienie wartości ekstremalnych naprężeń w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 16.

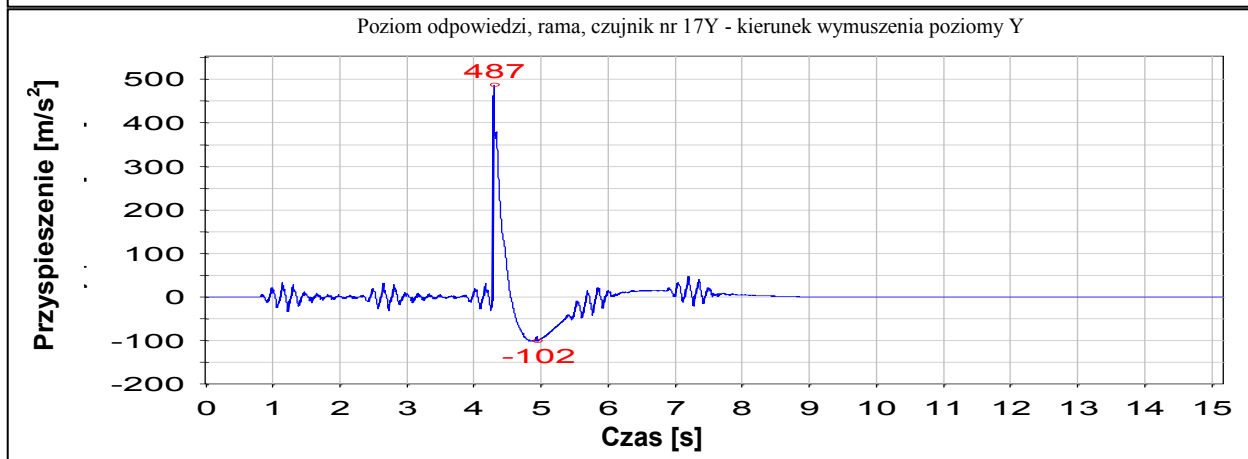
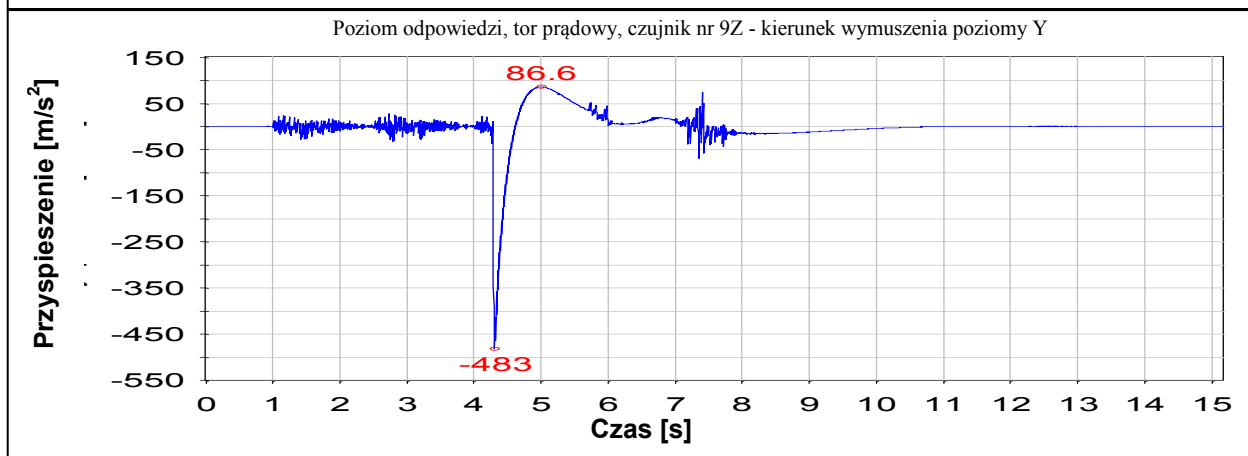
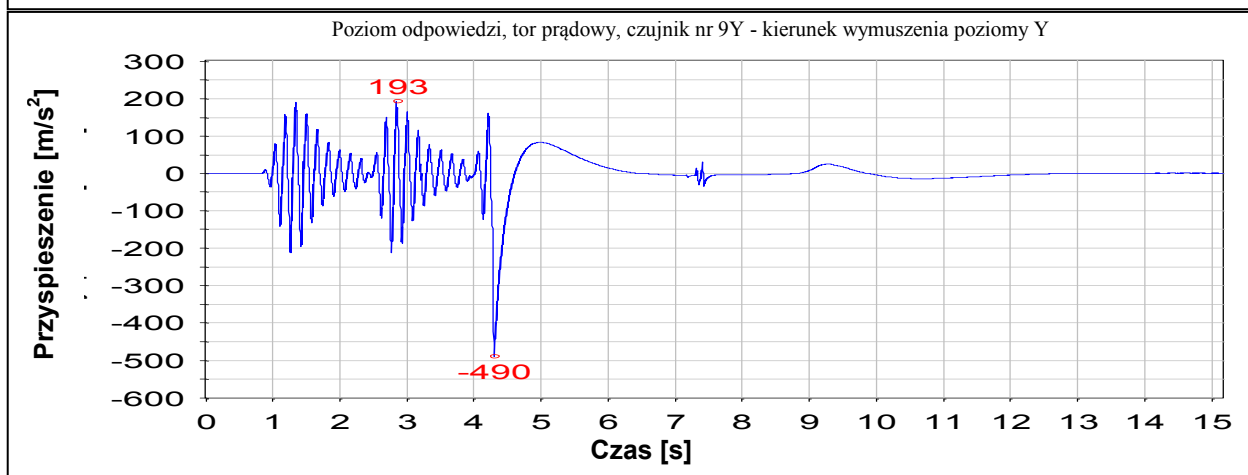
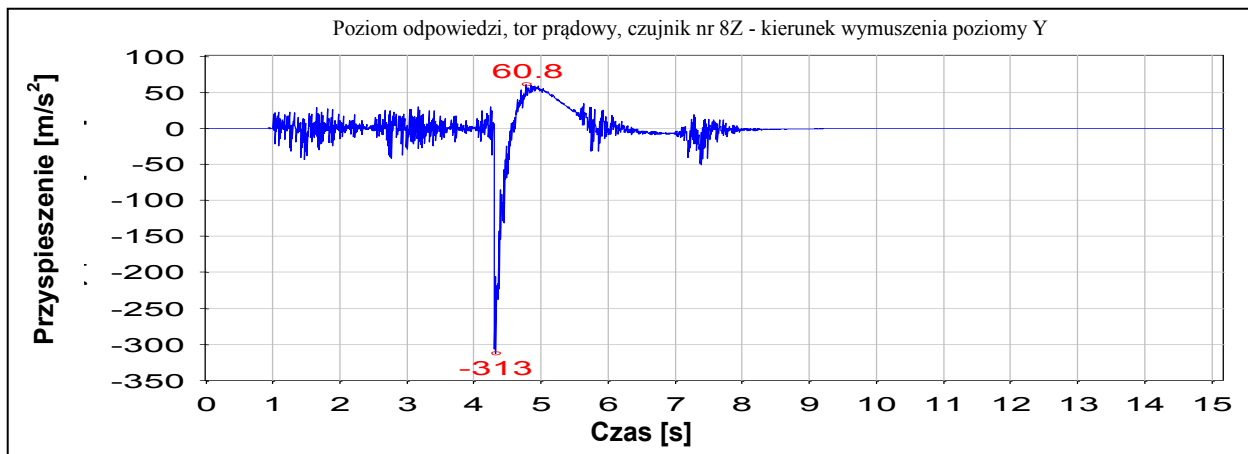
Na Rys. 3.99 przedstawiono wykresy wymuszenia dla testu zniszczeniowego nr 16 w postaci przebiegu przemieszczenia oraz przyspieszenia w funkcji czasu dla platformy stołu wstrząsowego (na wykresach zaznaczono wartości ekstremalne).

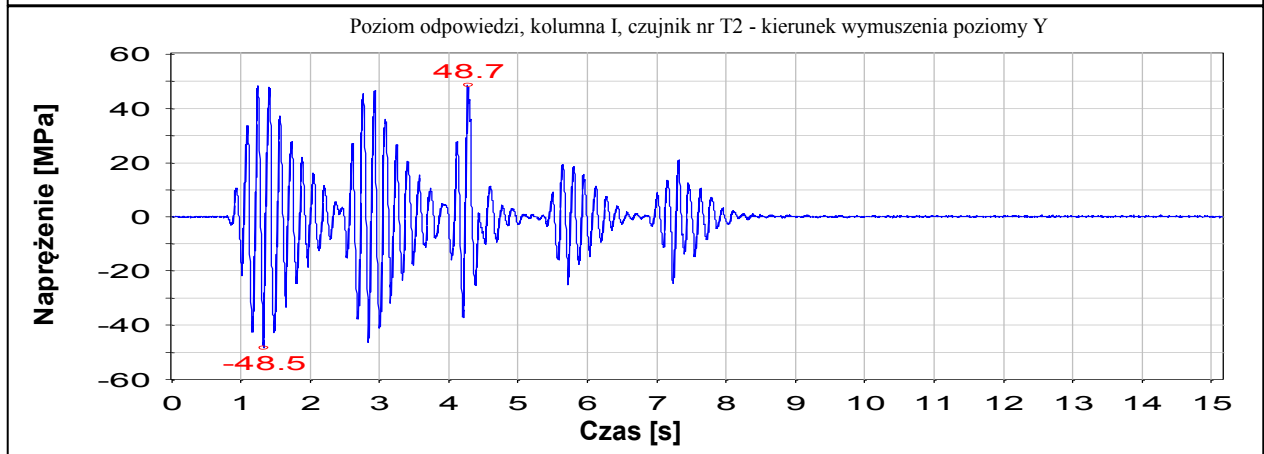
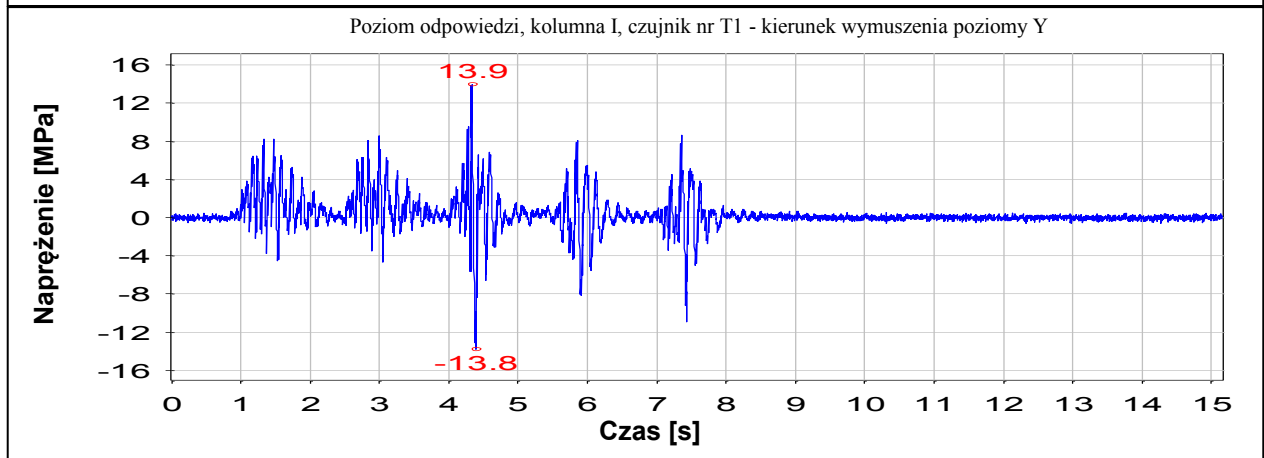
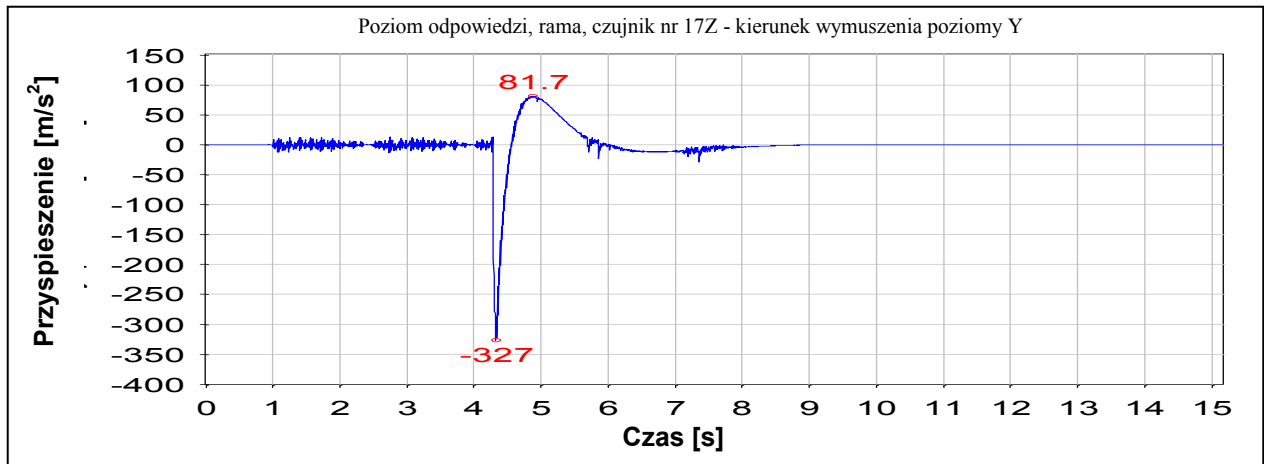


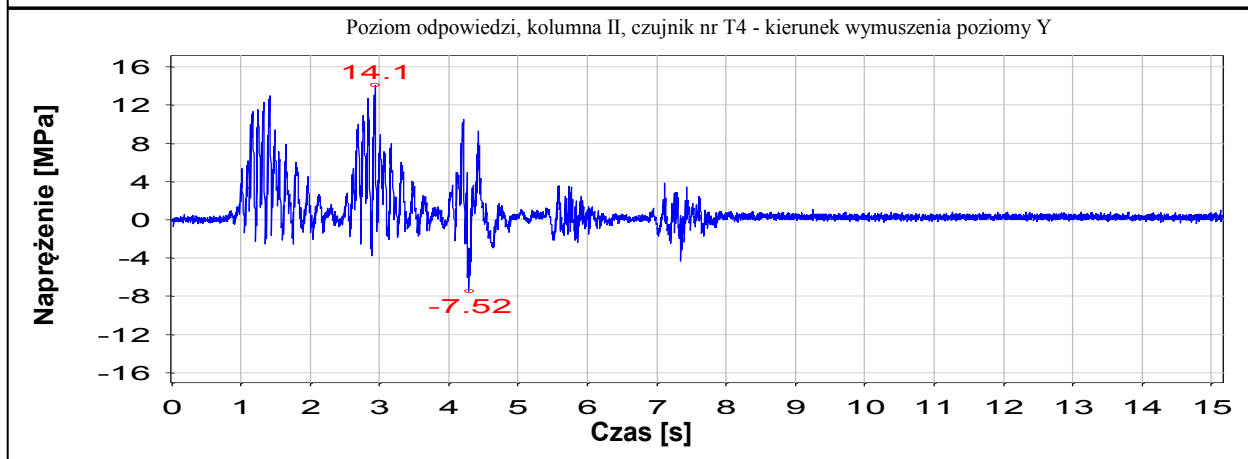
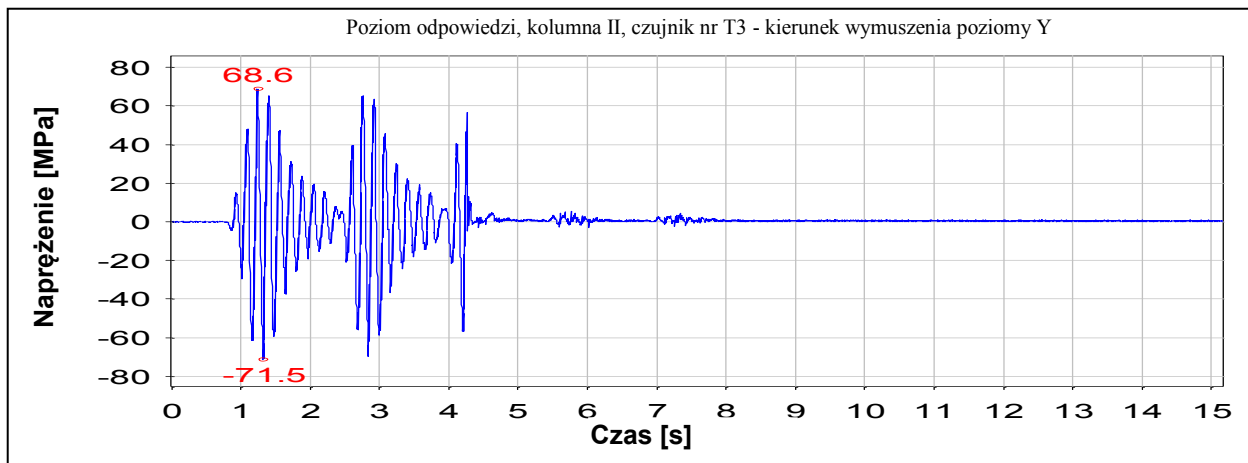
Rys. 3.99. Poziom zadany dla testu zniszczeniowego nr 16.

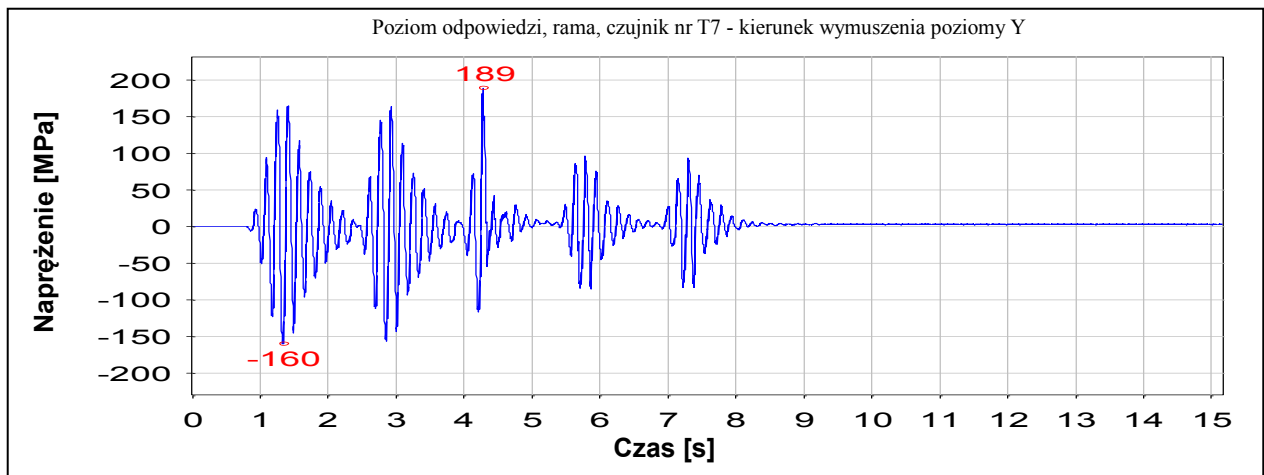
Rys. 3.100 prezentuje poziomy odpowiedzi konstrukcji odłącznika w postaci wykresów przebiegu przyspieszeń oraz naprężeń w funkcji czasu w różnych punktach pomiarowych dla testu zniszczeniowego nr 16.











Rys. 3.100. Poziomy odpowiedzi dla testu zniszczeniowego nr 16.

3.6 Wnioski

W niniejszym rozdziale szczegółowo opisano badania eksperymentalne dotyczące dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia. W pierwszym etapie przeprowadzono szereg badań impulsowych na sztywnym fundamencie, w celu wyznaczenia dominujących częstotliwości oraz postaci drgań własnych konstrukcji. Dalsze badania przeprowadzono na stole wstrząsowym, na którym powtórzono testy impulsowe oraz wykonano testy sweep-sine. W ostatniej części rozdziału opisano badania zniszczeniowe mające na celu określenie odporności sejsmicznej analizowanego odłącznika.

W wyniku przeprowadzonych badań impulsowych na sztywnym fundamencie otrzymano szczegółowe wyniki zawierające szereg dominujących częstotliwości oraz formy drgań własnych konstrukcji dla konfiguracji zamkniętej oraz otwartej. Badania modalne przeprowadzone po zamocowaniu odłącznika do platformy stołu wstrząsowego pokazały spadek częstotliwości drgań własnych, ze względu na podatność stołu oraz interakcję drgań pomiędzy stołem a odłącznikiem. Warto nadmienić, iż ze względu na różne sposoby posadowienia odłączników wysokich napięć w stacjach elektroenergetycznych (np. na dodatkowym ruszcie stalowym) oraz na wpływ podłoża gruntowego taki spadek częstotliwości drgań własnych może mieć miejsce w rzeczywistości. W wyniku różnych badań modalnych (badania impulsowe – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza naprężeń) przeprowadzonych dla odłącznika zamocowanego na stole wstrząsowym uzyskano bardzo podobne wartości dominujących częstotliwości drgań własnych konstrukcji, co potwierdza skuteczność każdej z użytych metod. Badania zniszczeniowe pokazały, iż rama podstawy oraz dolne części kolumn są

miejscami najbardziej wyężonymi na skutek działania obciążeń dynamicznych. W miejscach tych zaobserwowano największe wartości naprężeń. Ostatecznie, konstrukcja odłącznika uległa trwałemu uszkodzeniu na skutek pęknięcia czopa łożyska w stopie obrotowej u dołu jednej z kolumn. Wyniki badań eksperymentalnych pokazują jednak, że testowana konstrukcja była w stanie wytrzymać relatywnie silne drgania, przewyższające III stopień eksploatacyjny wg normy PN-EN 60068-3-3.

4 Analizy numeryczne

Po przeprowadzeniu szczegółowych badań eksperymentalnych przystąpiono do wykonania nieliniowych analiz numerycznych z wykorzystaniem MES (Hughes 1978, Kleiber 1985, Zienkiewicz i Taylor 2002), których głównym celem było zbadanie zachowania się dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia poddanego rzeczywistym wstrząsom sejsmicznym.

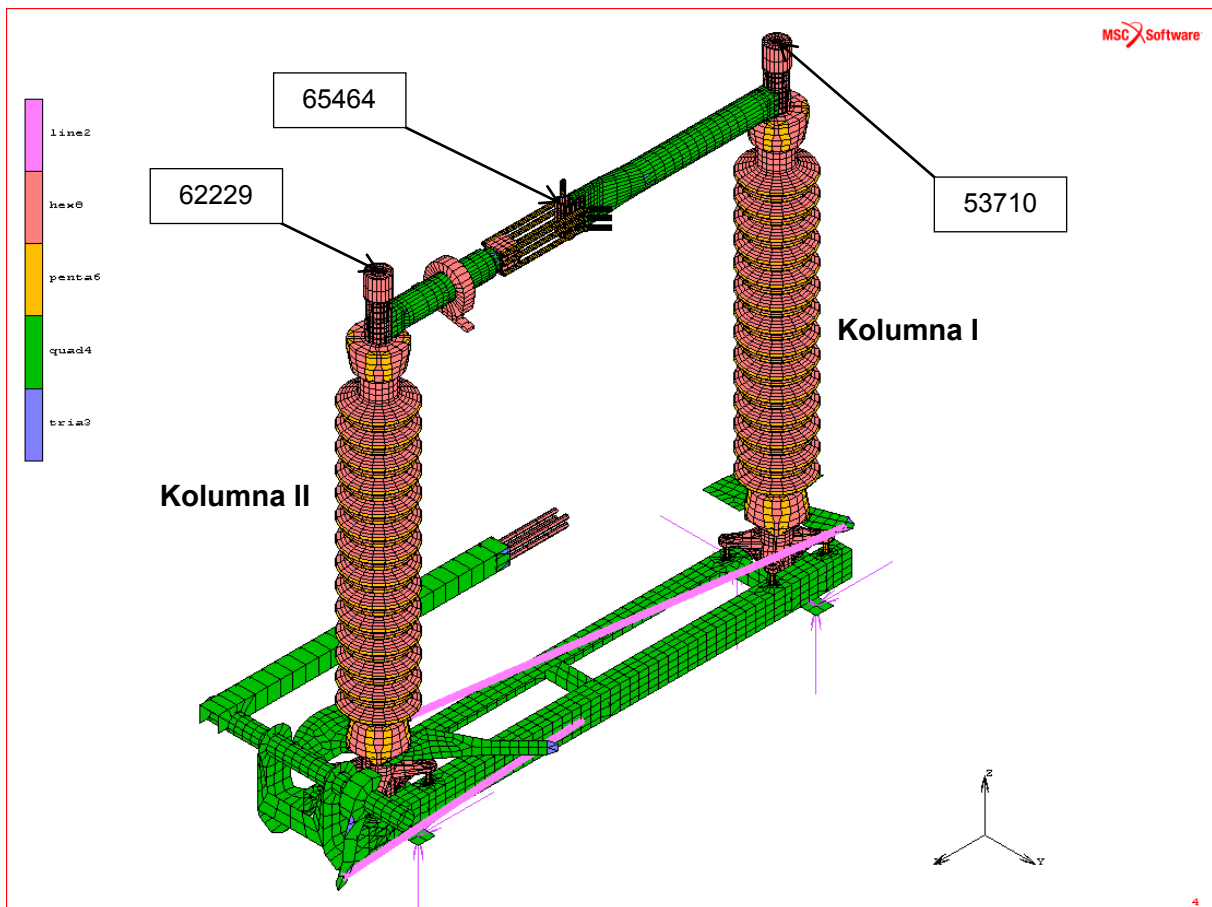
4.1 Model numeryczny konstrukcji odłącznika zamkniętego oraz otwartego

Model numeryczny konstrukcji odłącznika zamkniętego oraz otwartego stworzono w programie MSC MARC posługując się elementami belkowymi, płytowymi trzy- i czterowęzłowymi oraz bryłowymi ośmio- i sześciowęzłowymi (zob. Bathe 1982, Hartmann i Katz 2004). Kolumny izolatorów wraz z podstawami i szczytami, styki torów prądowych, głowice obrotowe, śruby mocujące oraz styki uziemnika zamodelowano elementami bryłowymi. Do modelowania ramy podstawy odłącznika, ramion torów prądowych i uziemnika, płyt wsporczych uziemnika oraz paneli systemu obrotowego użyto elementów powłokowych. Drażki łączące panele systemu obrotowego zamodelowano elementami belkowymi. Gotowy model numeryczny, zarówno w konfiguracji zamkniętej jak i otwartej, składał się z 41597 elementów bryłowych, 3249 elementów powłokowych oraz 8 elementów belkowych. Całkowita liczba węzłów wyniosła 50987. W modelu zadeklarowano odpowiednie właściwości mechaniczne poszczególnych materiałów zgodnie z Tabelą 4.1.

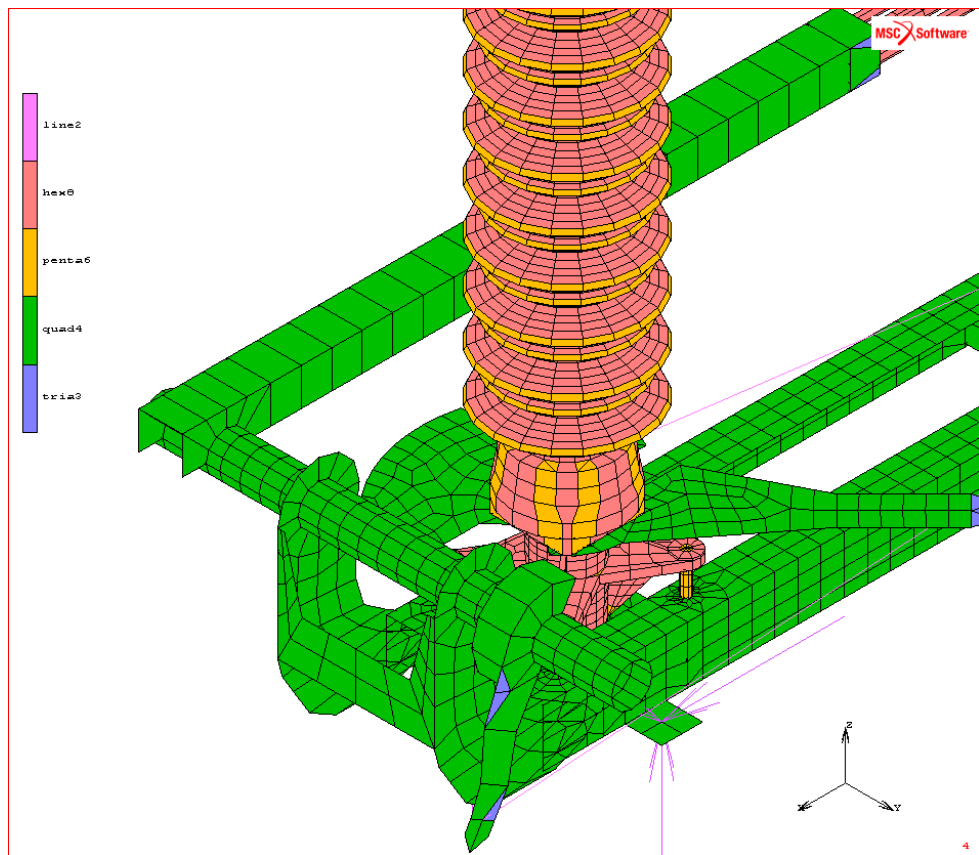
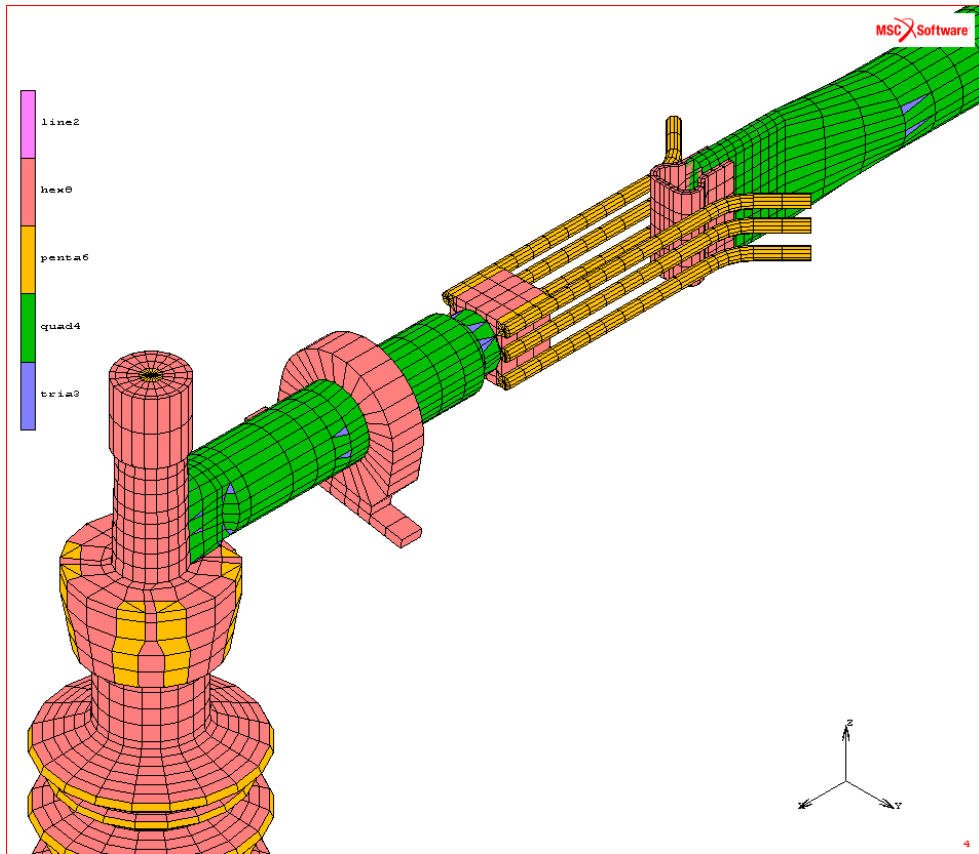
Element konstrukcji	Materiał	Gęstość [kg/m ³]	Moduł sprężystości [GPa]	Granica plastyczności/wytrzymałości [MPa]
Izolatory	ceramika (porcelana)	2500	124	47 (rozciąganie) 470 (ściskanie)
Rama podstawy	stal	7850	210	235
Stopy izolatorów	stal	7850	210	235
Stopy obrotowe	aluminium	2700	75	200
Tory prądowe	aluminium	2700	64	200

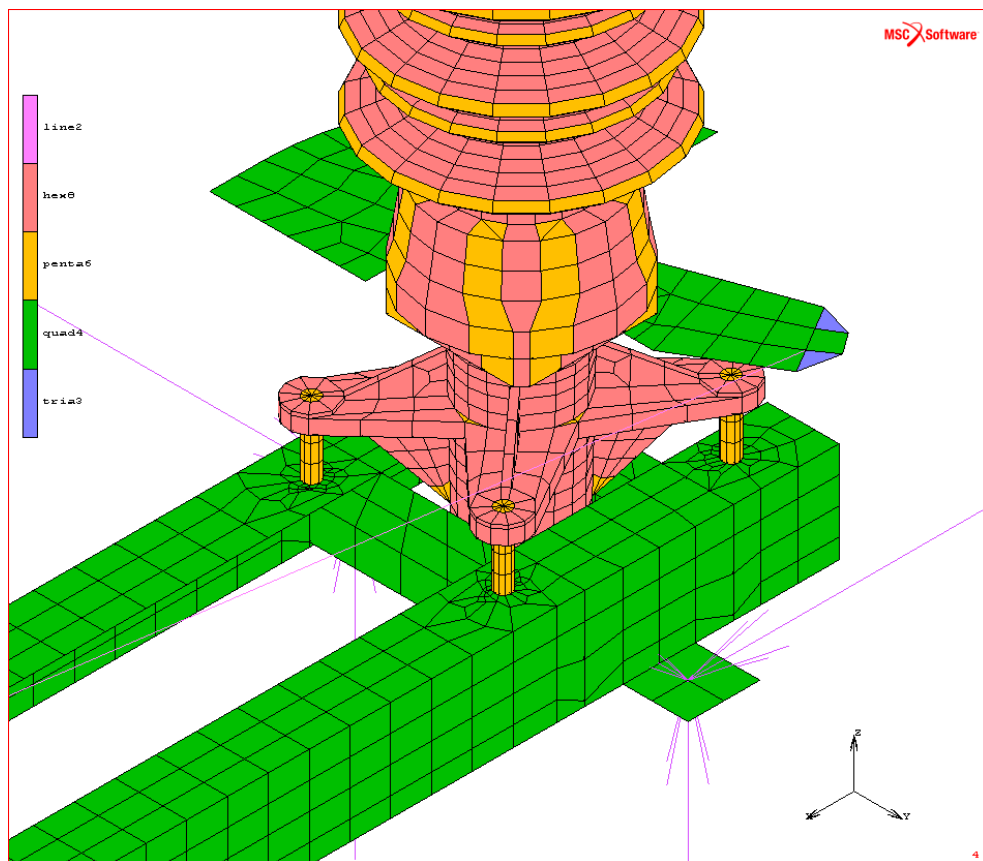
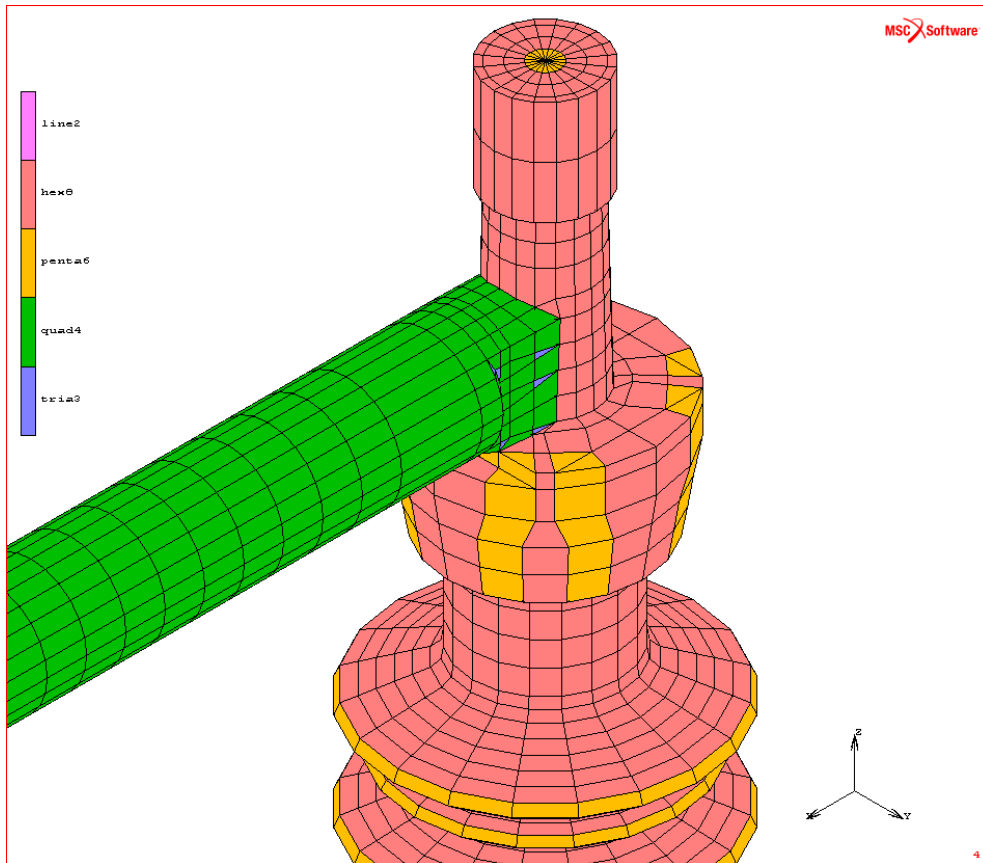
Tabela 4.1. Zestawienie właściwości mechanicznych poszczególnych materiałów.

W modelu numerycznym odłącznika w konfiguracji zamkniętej oraz otwartej przyjęto elastyczno-plastyczne modele materiału dla poszczególnych metalowych elementów konstrukcji oraz założono odpowiednią odporność na kruche pękanie w przypadku ceramiki (odpowiednie wartości granicy plastyczności oraz wytrzymałości zestawiono w Tabeli 4.1). Topologię modelu odłącznika zamkniętego przedstawiono na Rys. 4.1 (strzałkami zaznaczono lokalizacje węzłów referencyjnych). Szczegóły tego modelu wraz z podziałem na typy elementów pokazano dodatkowo na Rys. 4.2. W modelu tym uwzględniono ponadto nieliniowość geometryczną, w odniesieniu do stykających się ramion odłącznika zamkniętego, poprzez użycie sześciu elementów kontaktowych typu GAP (zob. Wriggers 2002) łączących węzły w części palcowej z odpowiednimi węzłami części stykowej toru prądowego. W miejscach tych zadeklarowano dodatkowo zestaw sił ściskających o łącznej wartości 180 N (wartość siły ściskającej ramiona toru prądowego w rzeczywistej konstrukcji). Topologię modelu numerycznego odłącznika w konfiguracji otwartej przedstawiono na Rys. 4.3 (strzałkami zaznaczono lokalizacje węzłów referencyjnych). Szczegóły tego modelu wraz z podziałem na typy elementów pokazano dodatkowo na Rys. 4.4.

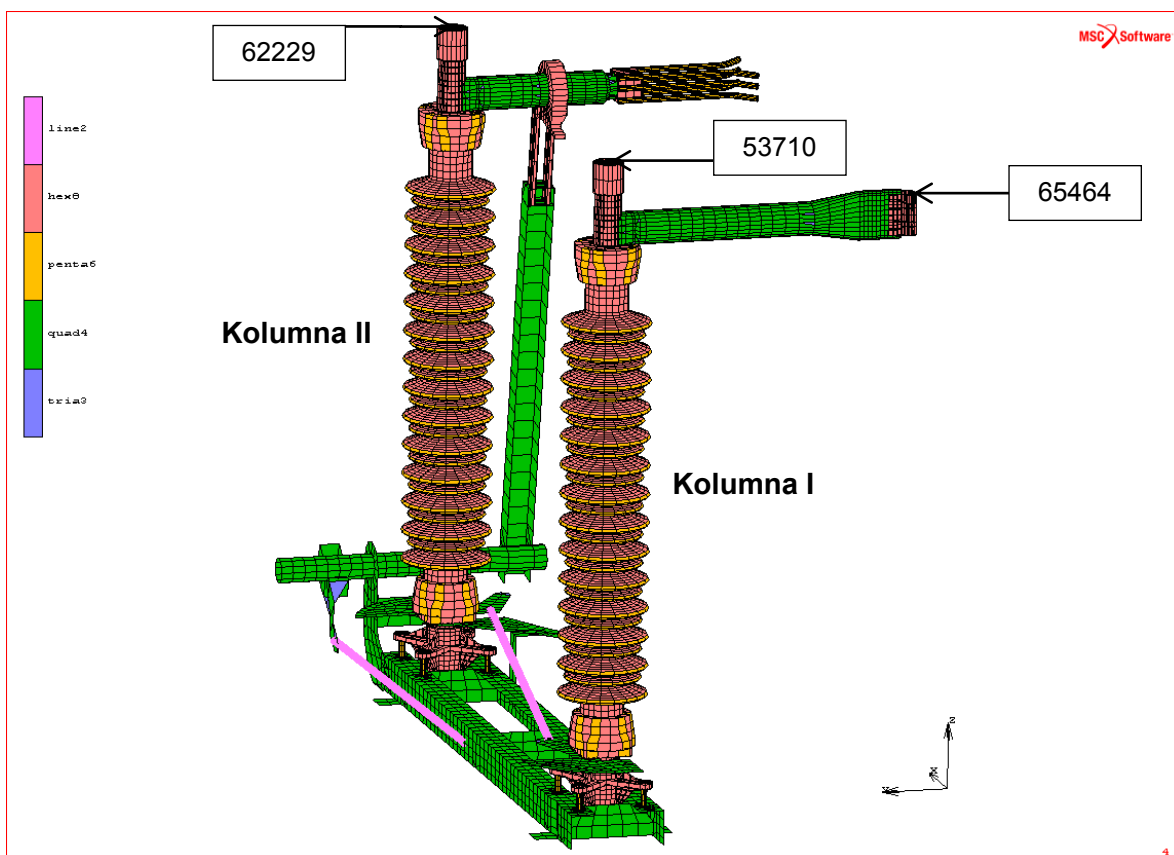
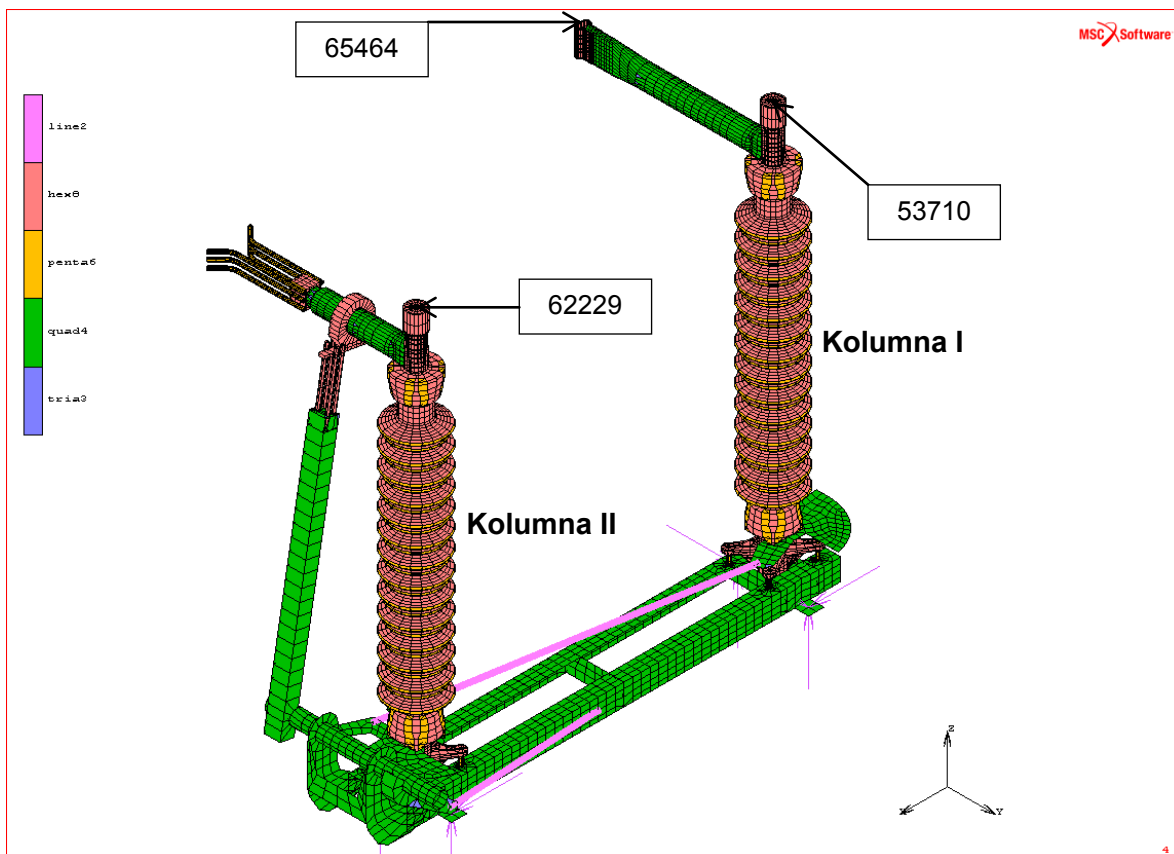


Rys. 4.1. Model numeryczny odłącznika w konfiguracji zamkniętej.

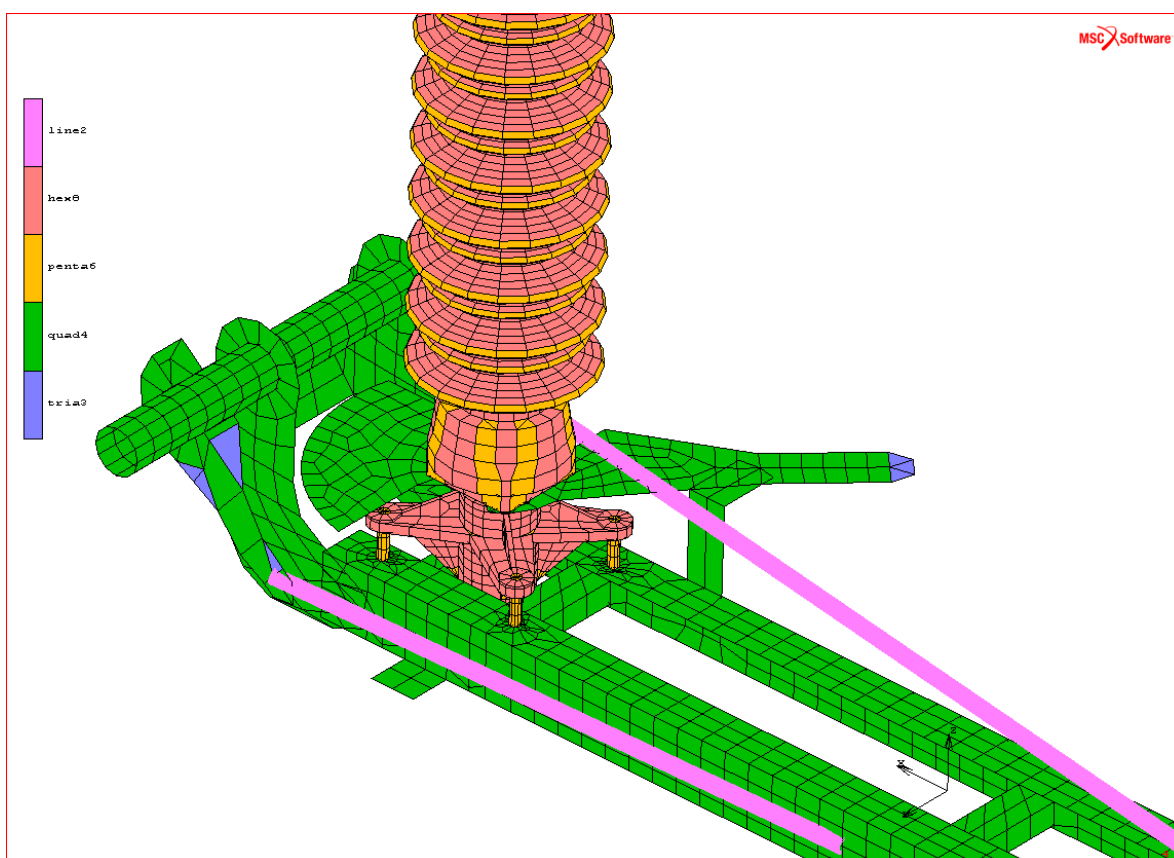
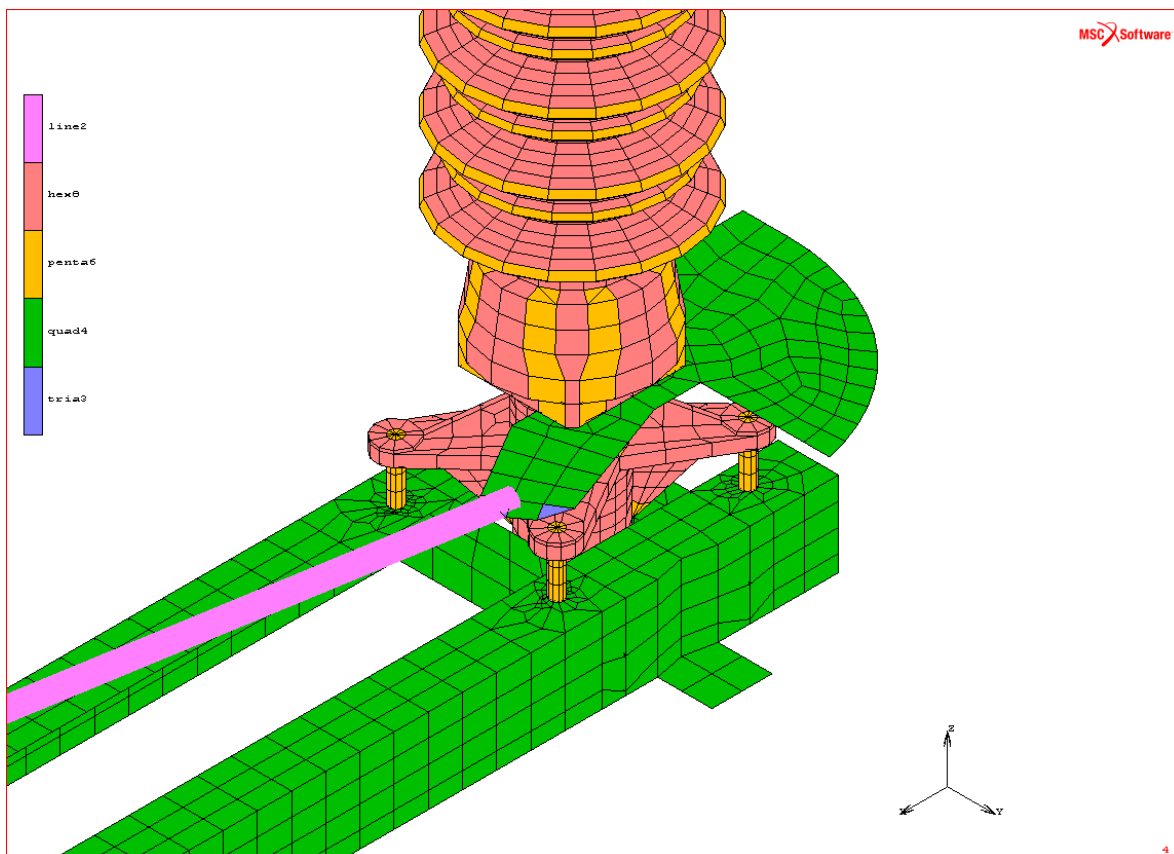




Rys. 4.2. Szczegóły modelu odłącznika w konfiguracji zamkniętej wraz z podziałem na typy elementów.

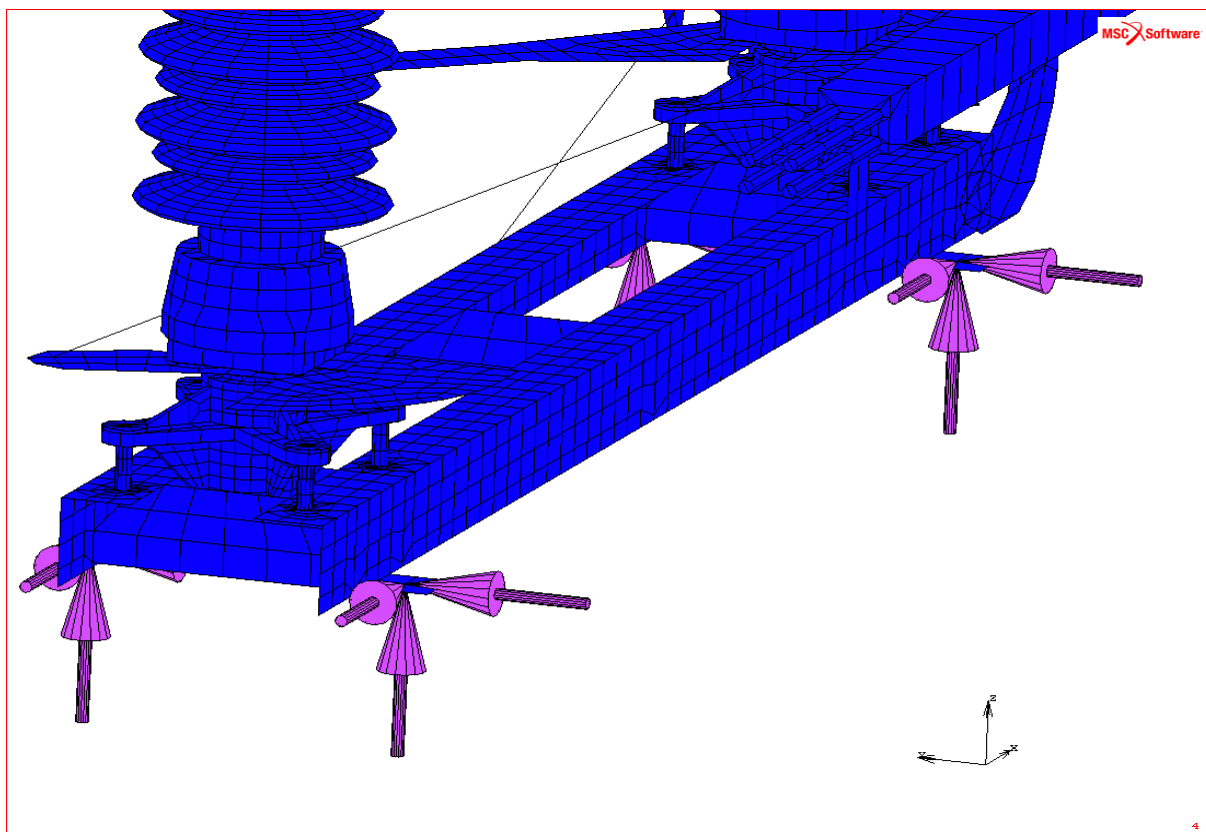


Rys. 4.3. Model numeryczny odłącznika w konfiguracji otwartej.



Rys. 4.4. Szczegóły modelu odłącznika w konfiguracji otwartej wraz z podziałem na typy elementów.

Jako warunki brzegowe przyjęto utwierdzenie trzech przemieszczeniowych stopni swobody (dwóch poziomych na kierunkach X, Y oraz pionowego Z) w czterech węzłach, odpowiadających lokalizacji śrub mocujących konstrukcję odłącznika do podłoża. Graficzne przedstawienie warunków brzegowych pokazano na Rys. 4.5.



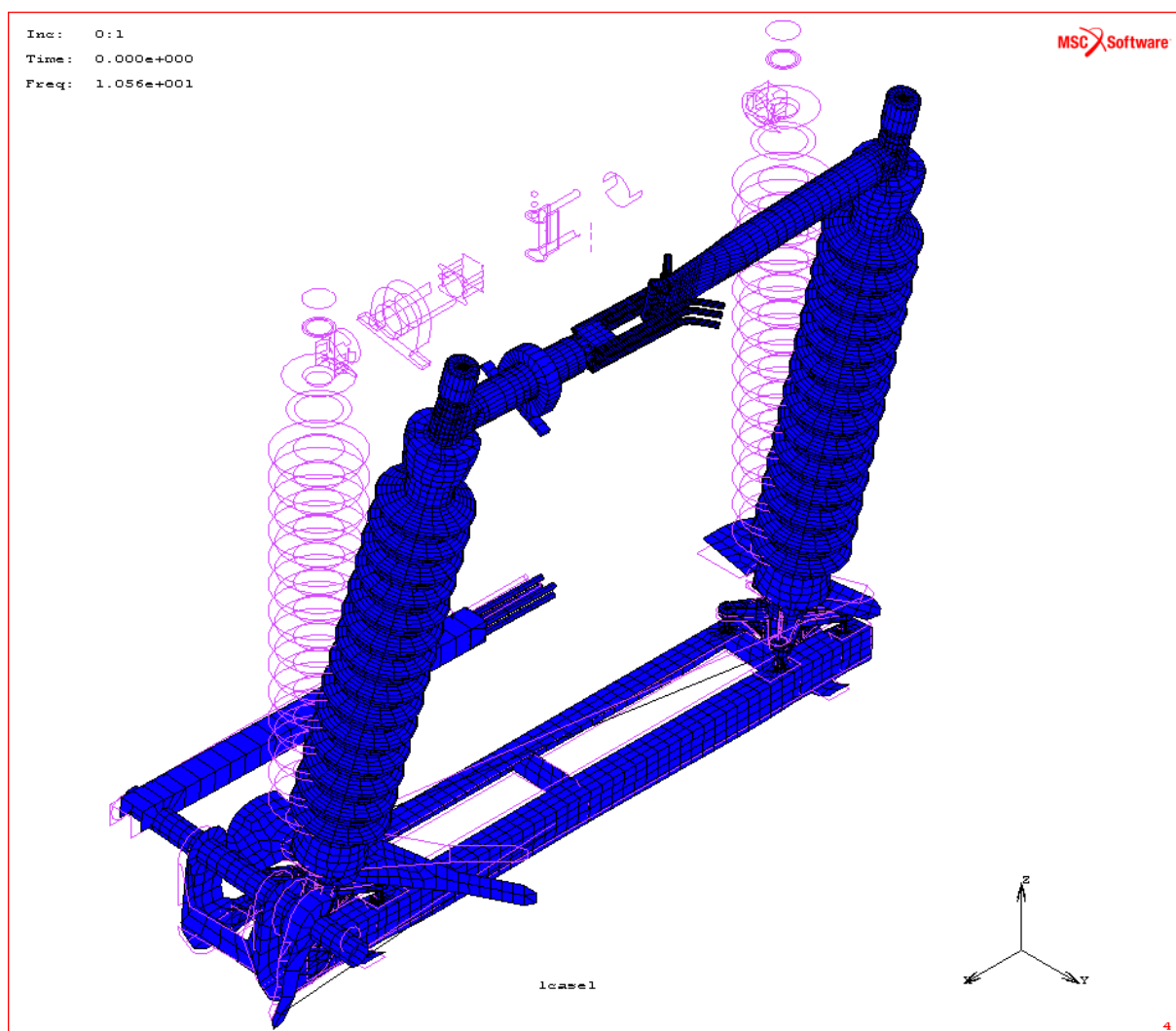
Rys. 4.5. Warunki brzegowe.

4.2 Analiza modalna

W pierwszym etapie wykonano analizę modalną w celu weryfikacji dokładności stworzonego modelu numerycznego odłącznika w konfiguracji zamkniętej oraz otwartej.

4.2.1 Wyniki analizy modalnej dla odłącznika zamkniętego

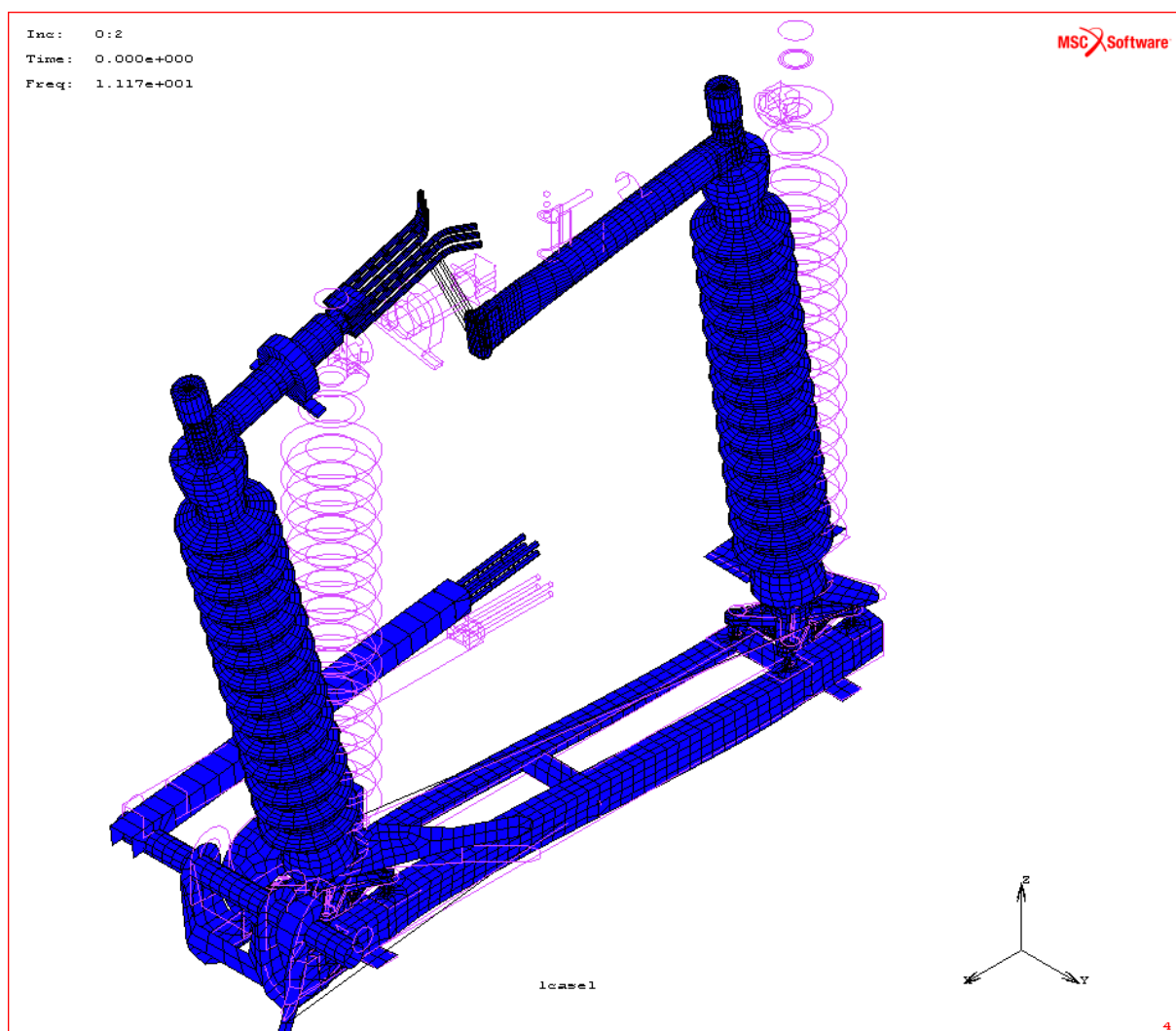
W zakresie do 20 Hz wyznaczono 4 główne formy i częstotliwości drgań własnych odłącznika w konfiguracji zamkniętej. Pierwszą formę drgań własnych odłącznika, otrzymaną dla częstotliwości 10,56 Hz, przedstawiono na Rys. 4.6.



Rys. 4.6. Pierwsza częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika zamkniętego (10,56 Hz).

Jak widać z Rys. 4.6 forma drgań własnych dla częstotliwości 10,56 Hz jest formą giętą poprzeczną (kierunek Y) z obiema kolumnami wychylającymi się jednocześnie w tę samą stronę. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika zamkniętego (patrz podrozdział 3.2.3.1.1), dla której częstotliwość wyniosła 9,83 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 7,4%.

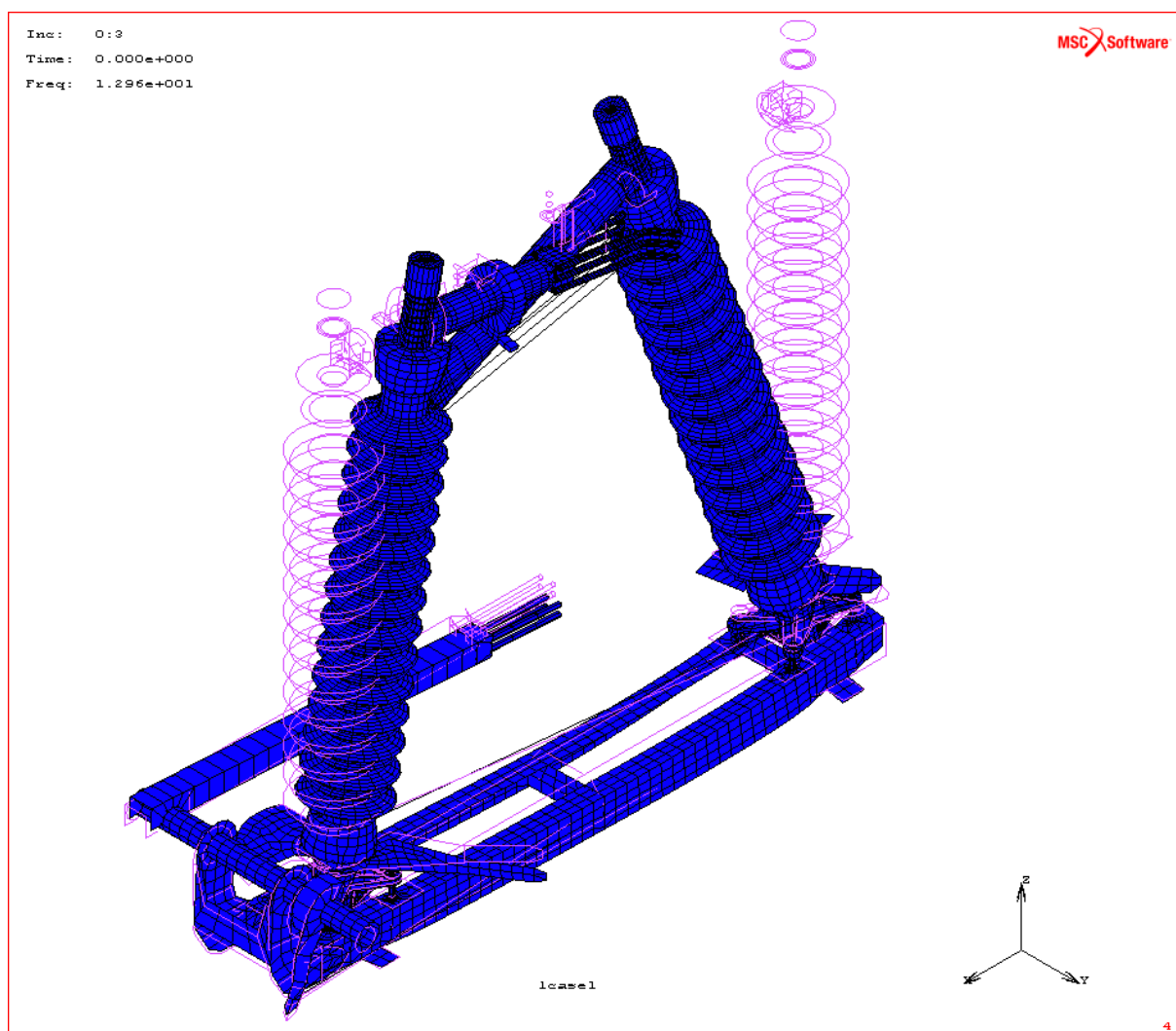
Drugą formę drgań własnych odłącznika w konfiguracji zamkniętej, otrzymaną dla częstotliwości 11,17 Hz, przedstawiono na Rys. 4.7.



Rys. 4.7. Druga częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika zamkniętego (11,17 Hz).

Jak widać z Rys. 4.7 forma drgań własnych dla częstotliwości 11,17 Hz jest formą giętą wzdłużną (kierunek X) z obiema kolumnami wychylającymi się jednocześnie w tę samą stronę. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika zamkniętego (patrz podrozdział 3.2.3.3.1), dla której częstotliwość wyniosła 12,93 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 13,6%.

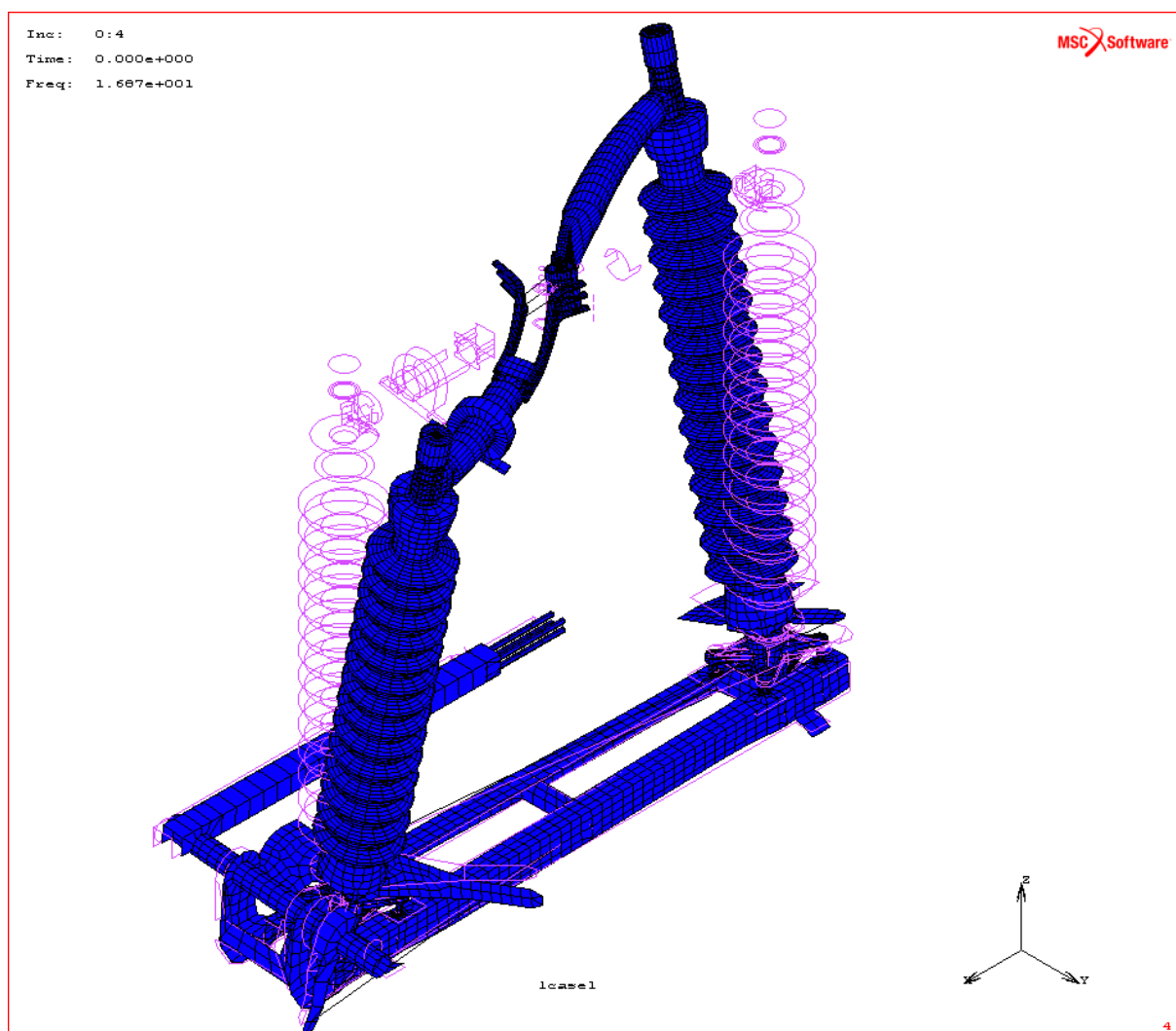
Trzecią formę drgań własnych odłącznika w konfiguracji zamkniętej, otrzymaną dla częstotliwości 12,96 Hz, przedstawiono na Rys. 4.8.



Rys. 4.8. Trzecia częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika zamkniętego (12,96 Hz).

Jak widać z Rys. 4.8 forma drgań własnych dla częstotliwości 12,96 Hz jest formą giętą wzdłużną (kierunek X) z kolumnami wychylającymi się w przeciwne strony. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika zamkniętego (patrz podrozdział 3.2.3.3.1), dla której częstotliwość wyniosła 12,93 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 0,2%.

Czwartą formę drgań własnych odłącznika w konfiguracji zamkniętej, otrzymaną dla częstotliwości 16,87 Hz, przedstawiono na Rys. 4.9.

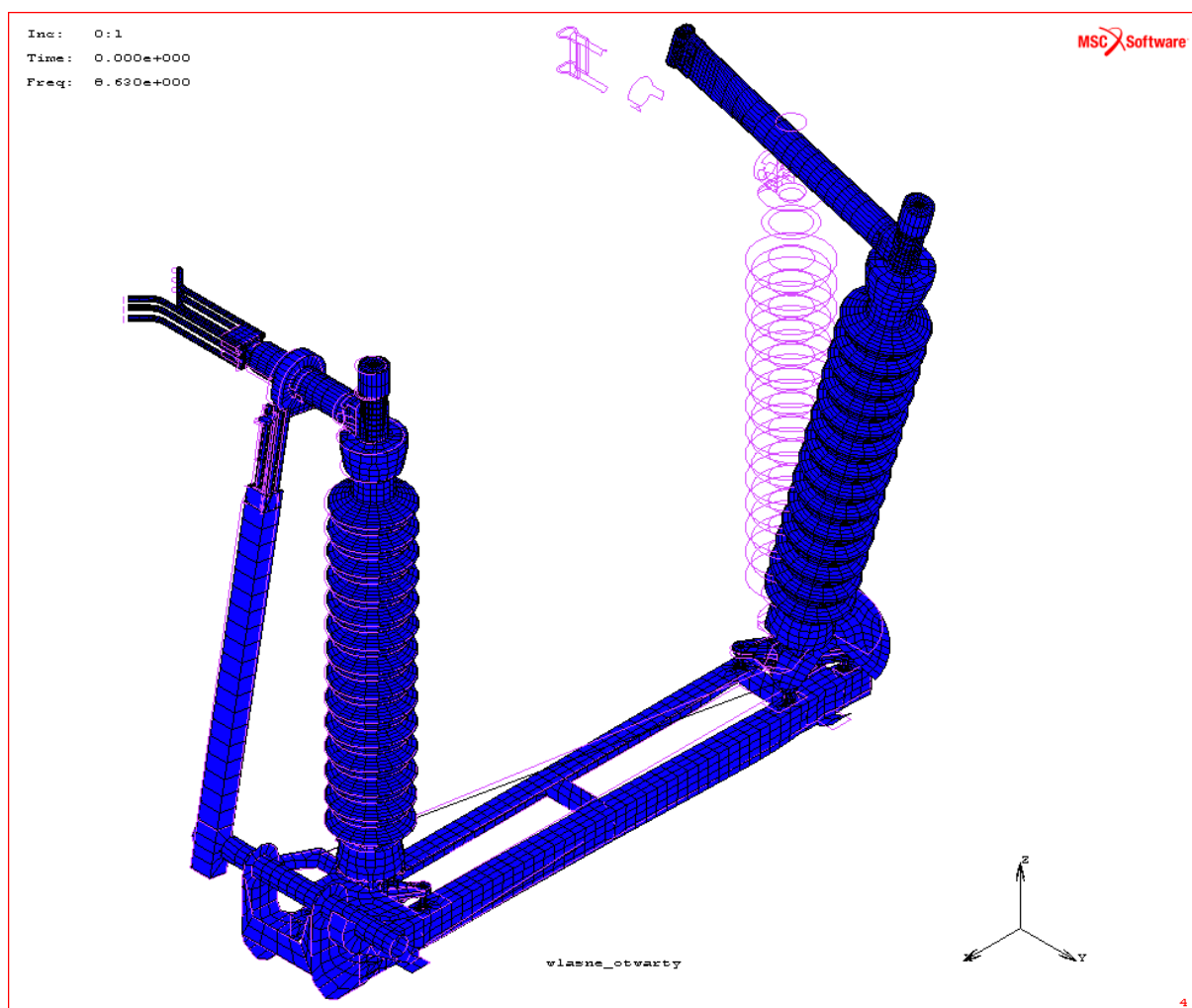


Rys. 4.9. Czwarta częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika zamkniętego (16,87 Hz).

Jak widać z Rys. 4.9 forma drgań własnych dla częstotliwości 16,87 Hz jest formą skrętną z kolumnami wychylającymi się w przeciwne strony kierunku Y. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika zamkniętego (patrz podrozdział 3.2.3.1.2), dla której częstotliwość wyniosła 15,58 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 8,3%.

4.2.2 Wyniki analizy modalnej dla odłącznika otwartego

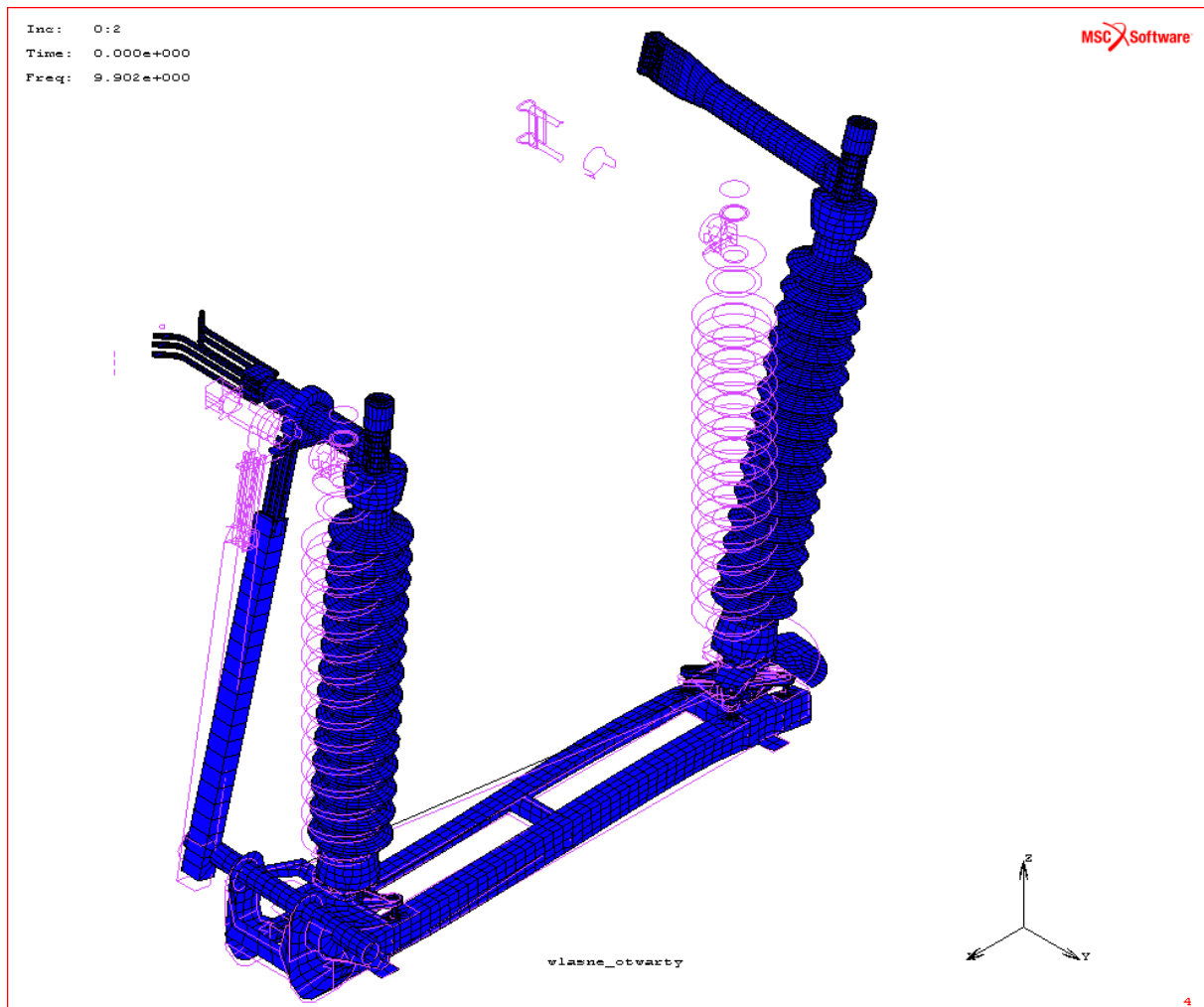
W zakresie do 20 Hz wyznaczono 4 główne formy i częstotliwości drgań własnych odłącznika w konfiguracji otwartej. Pierwszą formę drgań własnych odłącznika, otrzymaną dla częstotliwości 8,63 Hz, przedstawiono na Rys. 4.10.



Rys. 4.10. Pierwsza częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika otwartego (8,63 Hz).

Jak widać z Rys. 4.10 forma drgań własnych dla częstotliwości 8,63 Hz jest formą giętą poprzeczną (kierunek Y), w której pobudzona jest jedynie kolumna I. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika otwartego (patrz podrozdział 3.2.3.5.1), dla której częstotliwość wyniosła 8,45 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 2,1%.

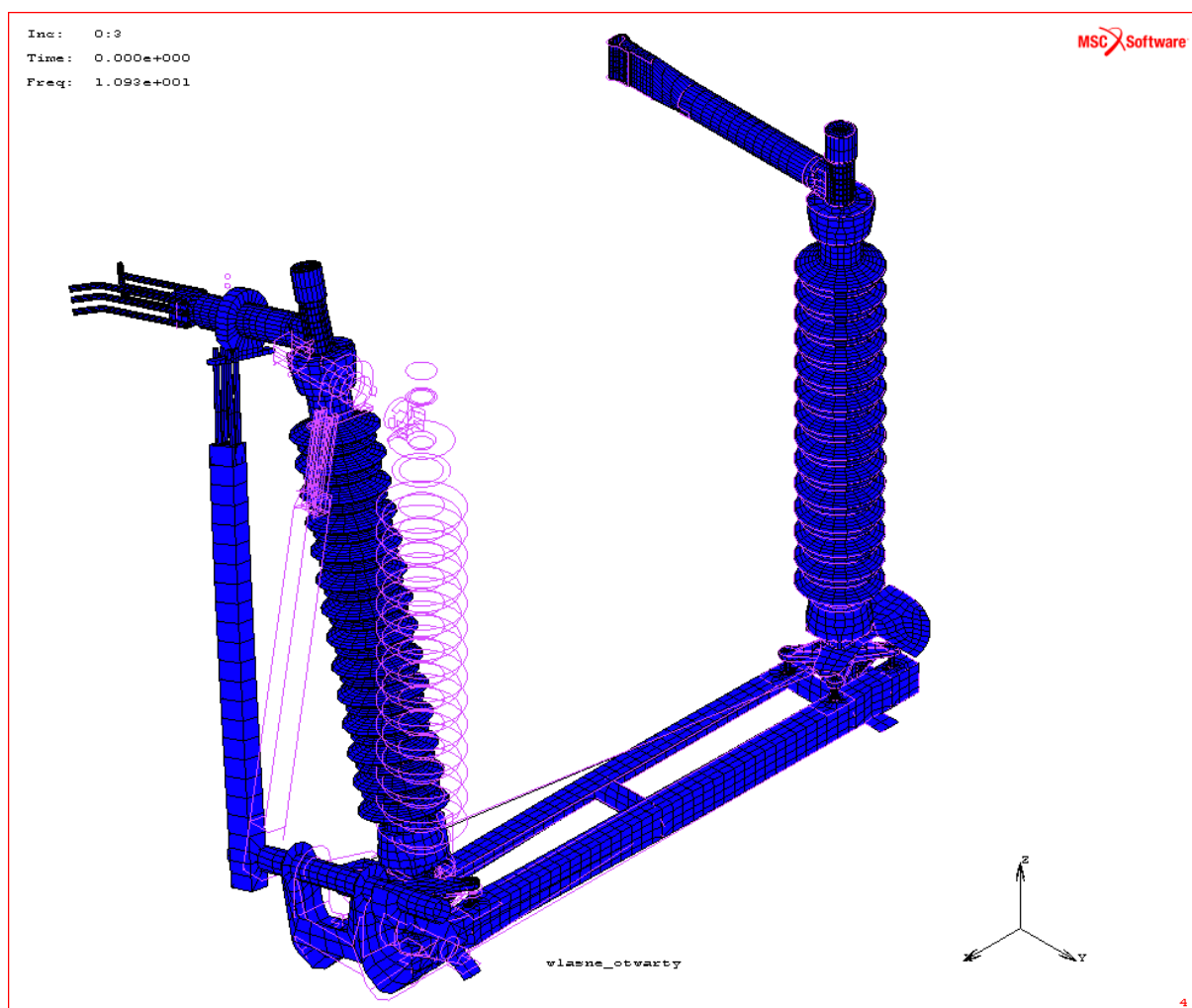
Drugą formę drgań własnych odłącznika w konfiguracji otwartej, otrzymaną dla częstotliwości 9,9 Hz, przedstawiono na Rys. 4.11.



Rys. 4.11. Druga częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika otwartego (9,9 Hz).

Jak widać z Rys. 4.11 forma drgań własnych dla częstotliwości 9,9 Hz jest formą giętą wzdłużną (kierunek X) z obiema kolumnami wychylającymi się jednocześnie w tę samą stronę. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika otwartego (patrz podrozdział 3.2.3.7.1), dla której częstotliwość wyniosła 9,11 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 8,7%.

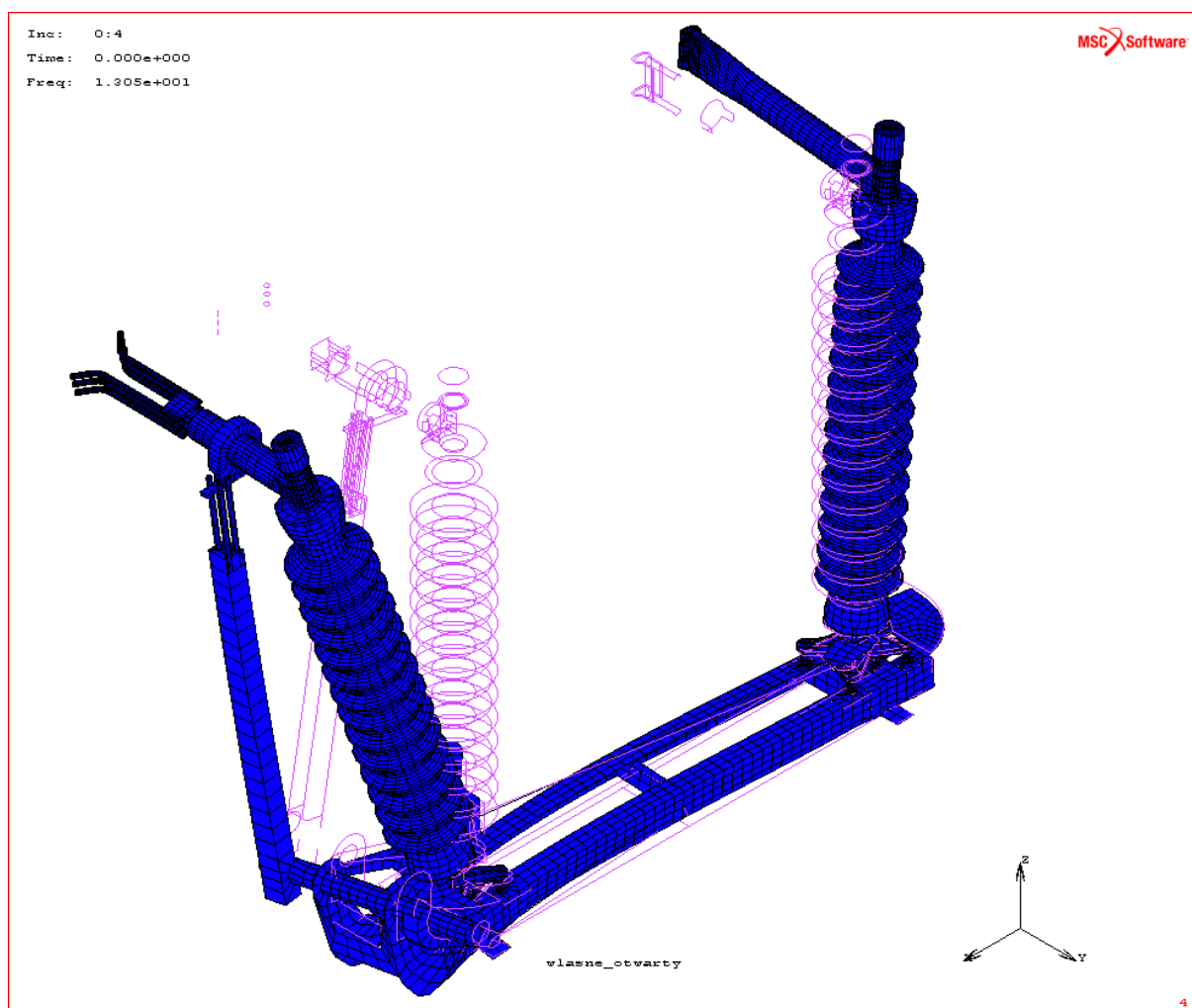
Trzecią formę drgań własnych odłącznika w konfiguracji otwartej, otrzymaną dla częstotliwości 10,93 Hz, przedstawiono na Rys. 4.12.



Rys. 4.12. Trzecia częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika zamkniętego (10,93 Hz).

Jak widać z Rys. 4.12 forma drgań własnych dla częstotliwości 10,93 Hz jest formą giętą poprzeczną (kierunek Y), w której pobudzona jest jedynie kolumna II. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika otwartego (patrz podrozdział 3.2.3.6.1), dla której częstotliwość wyniosła 10,08 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 8,4%.

Czwartą formę drgań własnych odłącznika w konfiguracji otwartej, otrzymaną dla częstotliwości 13,05 Hz, przedstawiono na Rys. 4.13.



Rys. 4.13. Czwarta częstotliwość oraz forma drgań własnych odłącznika zamkniętego (13,05 Hz).

Jak widać z Rys. 4.13 forma drgań własnych dla częstotliwości 13,05 Hz jest formą giętą wzdłużną (kierunek X) z kolumnami wychylającymi się w przeciwne strony. Forma ta odpowiada postaci drgań własnych wyznaczonej eksperymentalnie dla odłącznika otwartego (patrz podrozdział 3.2.3.7.4), dla której częstotliwość wyniosła 13,00 Hz. Różnica pomiędzy wartością wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych a tą otrzymaną z numerycznej analizy modalnej wynosi 0,4%.

4.2.3 Zestawienie wyników

Tabela 4.2 zestawia wyniki numerycznej analizy modalnej dla odłącznika w konfiguracji zamkniętej pokazując wartości czterech pierwszych dominujących częstotliwości drgań własnych. W tabeli tej przedstawiono też wartości częstotliwości drgań własnych otrzymane z badań eksperymentalnych po zamocowaniu odłącznika na sztywnym fundamencie (patrz rozdział 3.2). Analogiczne zestawienie dla odłącznika w konfiguracji otwartej zawiera Tabela 4.3.

	Częstotliwości drgań własnych odłącznika zamkniętego [Hz]			
	I	II	III	IV
Model numeryczny	10,56	11,17	12,96	16,87
Eksperyment	9,83	12,93	12,93	15,58
Różnica [%]	7,4	13,6	0,2	8,3

Tabela 4.2. Zestawienie wyników analiz modalnych dla odłącznika zamkniętego.

	Częstotliwości drgań własnych odłącznika otwartego [Hz]			
	I	II	III	IV
Model numeryczny	8,63	9,90	10,93	13,05
Eksperyment	8,45	9,11	10,08	13,00
Różnica [%]	2,1	8,7	8,4	0,4

Tabela 4.3. Zestawienie wyników analiz modalnych dla odłącznika otwartego.

Porównanie wyników numerycznych analiz modalnych z wynikami badań eksperymentalnych (patrz Tabela 4.2 i 4.3) pokazuje relatywnie dobrą zgodność pomiędzy parametrami modelu numerycznego konstrukcji odłącznika a parametrami rzeczywistej konstrukcji, zarówno dla konfiguracji zamkniętej jak i otwartej. Różnice w wyznaczonych wartościach dominujących częstotliwości drgań własnych wahają się w przedziale od 0,2% do 13,6% (średni błąd wynosi 6,1%). Uzyskane wyniki potwierdzają zatem relatywnie dobrą dokładność stworzonego modelu numerycznego.

4.3 Nieliniowe analizy odpowiedzi konstrukcji odłącznika poddanego obciążeniom sejsmicznym

Po wykonaniu analizy modalnej oraz weryfikacji dokładności modelu numerycznego przystąpiono do przeprowadzenia analiz dynamicznych zachowania się odłącznika (zarówno w stanie zamkniętym jak i otwartym) poddanego rzeczywistym wymuszeniom sejsmicznym.

4.3.1 Dynamiczne równanie ruchu

Dynamiczne równanie ruchu w zakresie liniowym dla modelu dyskretnego konstrukcji odłącznika o skończonej liczbie stopni swobody, n , (patrz Rys. 4.1 i 4.3) poddanej oddziaływaniu dynamicznemu na skutek działania trzęsienia ziemi można zapisać w dziedzinie czasu, t , w postaci macierzowej (zob. Chopra 1995, Chmielewski i Zembaty 1998, Tatara 2012):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g(t), \quad (4.1)$$

gdzie \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} to odpowiednio: macierz mas, macierz tłumienia i macierz sztywności układu, $\ddot{\mathbf{u}}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$, $\mathbf{u}(t)$ oznaczają n -elementowe wektory przyspieszeń, prędkości i przemieszczeń, zaś $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ jest wektorem przyspieszeń drgań podłoża podczas trzęsienia ziemi, który można zapisać w postaci (Hart i Wong 2000, Tatara 2012):

$$\ddot{\mathbf{u}}_g(t) = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{gx}(t) \\ \ddot{u}_{gy}(t) \\ \ddot{u}_{gz}(t) \\ \ddot{u}_{g\theta x}(t) \\ \ddot{u}_{g\theta y}(t) \\ \ddot{u}_{g\theta z}(t) \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

gdzie $\ddot{u}_{gx}(t)$, $\ddot{u}_{gy}(t)$, $\ddot{u}_{gz}(t)$ to wartości przyspieszeń składowych translacyjnych w kierunkach poziomych X, Y oraz w kierunku pionowym Z, zaś $\ddot{u}_{g\theta x}(t)$, $\ddot{u}_{g\theta y}(t)$, $\ddot{u}_{g\theta z}(t)$ to wartości składowych obrotowych drgań wokół osi X, Y, Z. Z kolei, macierz \mathbf{I} w równaniu (4.1) przyjmuje postać:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} & I_{15} & I_{16} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & I_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{i1} & I_{i2} & I_{i3} & I_{i4} & I_{i5} & I_{i6} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & I_{n3} & I_{n4} & I_{n5} & I_{n6} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

gdzie elementy I_{ij} ($i=1..n, j=1..6$) mogą przyjmować wartość 0 lub 1. Każdy i -ty wiersz macierzy \mathbf{I} może być zapisany w następującej postaci w zależności od kierunku i -tego stopnia swobody (Hart i Wong 2000, Tataru 2012):

$$[I_{i1} \ I_{i2} \ I_{i3} \ I_{i4} \ I_{i5} \ I_{i6}] = \begin{cases} [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], & \text{dla kierunku X} \\ [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], & \text{dla kierunku Y} \\ [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0], & \text{dla kierunku Z} \\ [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0], & \text{dla kierunku } \theta X \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0], & \text{dla kierunku } \theta Y \\ [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1], & \text{dla kierunku } \theta Z \end{cases} \quad (4.4)$$

Gdy wymuszenie kinematyczne układu jest w postaci pomierzonych dwóch składowych poziomych na kierunkach X i Y oraz składowej pionowej Z trzęsienia ziemi, macierz \mathbf{I} redukuje się do macierzy o wymiarze $n \times 3$.

Uwzględniając nieliniowość materiałową oraz geometryczną, dynamiczne równanie ruchu (4.1) przyjmie postać (zob. Chopra 1995, Jankowski 2008):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{F}^S(t) + \mathbf{F}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g(t), \quad (4.5)$$

gdzie $\mathbf{F}^S(t)$ jest wektorem sił oporu uwzględniającym nieliniowość materiałową, zaś $\mathbf{F}(t)$ jest wektorem dodatkowych sił występujących przy uwzględnieniu nieliniowości geometrycznej związanej z interakcją pomiędzy częściami konstrukcji. Elementy $F_i^S(t)$ ($i=1..n$) wektora $\mathbf{F}^S(t)$ zmieniają swoją wartość liniowo zgodnie z prawem Hooke'a w zakresie sprężystym, zaś poza tym zakresem przyjmują wartość $F_i^S(t) = \pm F_i^Y$ (gdzie F_i^Y jest granicą plastyczności) dla modelu sprężysto-plastycznego materiału (metalowe części odłącznika) lub $F_i^S(t) = 0$ w przypadku modelu uwzględniającego kruche pękanie (ceramiczne części odłącznika) (zob. np. Jirásek i Bažant 2002). Z kolei, elementy $F_i(t)$ ($i=1..n$) wektora $\mathbf{F}(t)$ przyjmują wartości różne od zera dla tych stopni swobody układu, w których występuje kontakt (dla pozostałych stopni swobody $F_i(t) = 0$). W ten sposób istnieje możliwość przyłożenia dodatkowej siły zewnętrznej (siła docisku ramion odłącznika w

kierunku poprzecznym Y) lub uwzględnienie w danym kroku czasowym odpowiednich sił tarcia (poślizg w miejscach styku ramion w kierunku wzdłużnym X i pionowym Z) (zob. np. Zhong 1993, Jankowski 2008).

W modelu numerycznym przyjęto tłumienie Rayleigh'a zakładając, iż macierz tłumienia, \mathbf{C} , układu jest proporcjonalna do macierzy mas, \mathbf{M} , i sztywności, \mathbf{K} , zgodnie ze wzorem (Clough i Penzien 1993, Hall 2006, Stein *et al.* 2004):

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K}, \quad (4.6)$$

dla którego współczynniki a_0 i a_1 można wyznaczyć ze wzorów:

$$a_0 = 4\pi\xi \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2}, \quad (4.7)$$

$$a_1 = \frac{\xi}{\pi(f_1 + f_2)}, \quad (4.8)$$

gdzie f_1 , f_2 oznaczają dominujące częstotliwości drgań własnych konstrukcji.

4.3.2 Parametry analiz dynamicznych

Analizę dynamiczną przeprowadzono dla czterech różnych trzęsień ziemi (El Centro 1940, Kobe 1995, Kushiro 1993 oraz San Fernando 1971) deklarując obciążenie przebiegami czasowymi przyspieszeń w trzech kierunkach jednocześnie. Pomierzone składowe NS wstrząsów sejsmicznych (N16°W w przypadku trzęsienia ziemi San Fernando) zadeklarowano na kierunku poziomym poprzecznym Y, składowe EW (E16°N w przypadku trzęsienia ziemi San Fernando) na kierunku poziomym wzdłużnym X, a składowe UD na kierunku pionowym Z. Dane dotyczące trzęsień ziemi wykorzystanych w analizie zestawiono w Tabeli 4.4.

W analizie przyjęto elastyczno-plastyczne modele materiału dla poszczególnych metalowych elementów konstrukcji oraz założono odpowiednią odporność na kruche pękanie w przypadku ceramiki. W analizie uwzględniono ponadto nieliniowość geometryczną, w odniesieniu do stykających się ramion odłącznika, poprzez użycie elementów kontaktowych typu GAP. Do rozwiązania dynamicznego nieliniowego równania ruchu (4.5) zastosowano metodę Newmark'a (Newmark 1959) ze standardowymi parametrami $\gamma_N = 0,5$ i $\beta = 0,25$ zapewniającymi stabilność i dokładność wyników (zob. np. Bathe i Wilson 1973, Chopra 1995). Krok czasowy wynosił 0,01 s.

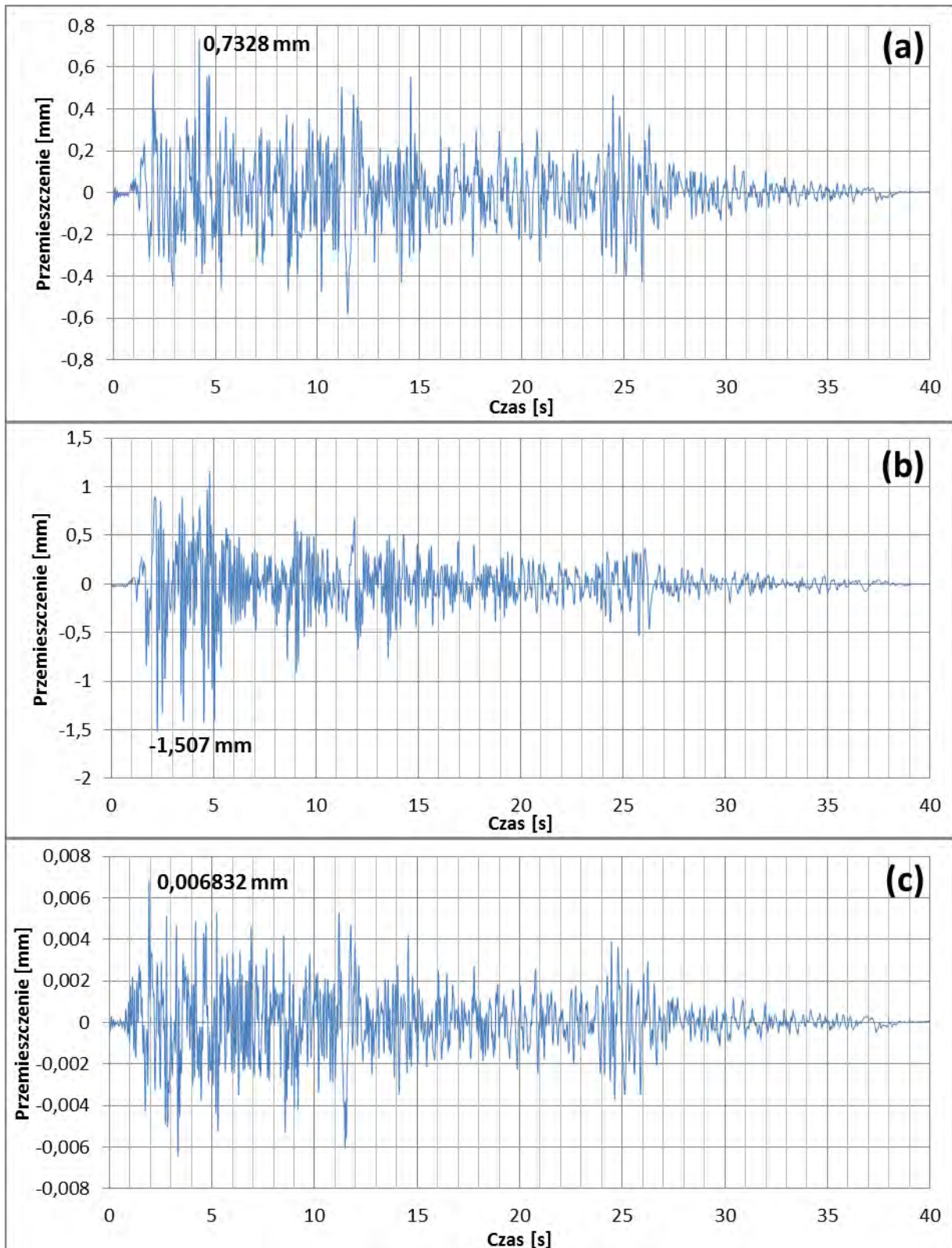
Trzęsienie ziemi	Data	Magnituda	Stacja pomiarowa	Składowa	Ekstremalna wartość przyspieszenia [m/s ²]
El Centro	18.05.1940	6,9	Imperial Valley	NS	3,069
				EW	2,107
				UD	2,013
Kobe	17.01.1995	7,2	JMA	NS	8,178
				EW	6,171
				UD	3,322
Kushiro	15.01.1993	7,8	JMA	NS	9,191
				EW	8,147
				UD	4,653
San Fernando	09.02.1971	6,6	Pacoima Dam	N16°W	12,026
				E16°N	11,370
				UD	6,853

Tabela 4.4. Trzęsienia ziemi wykorzystane w analizie.

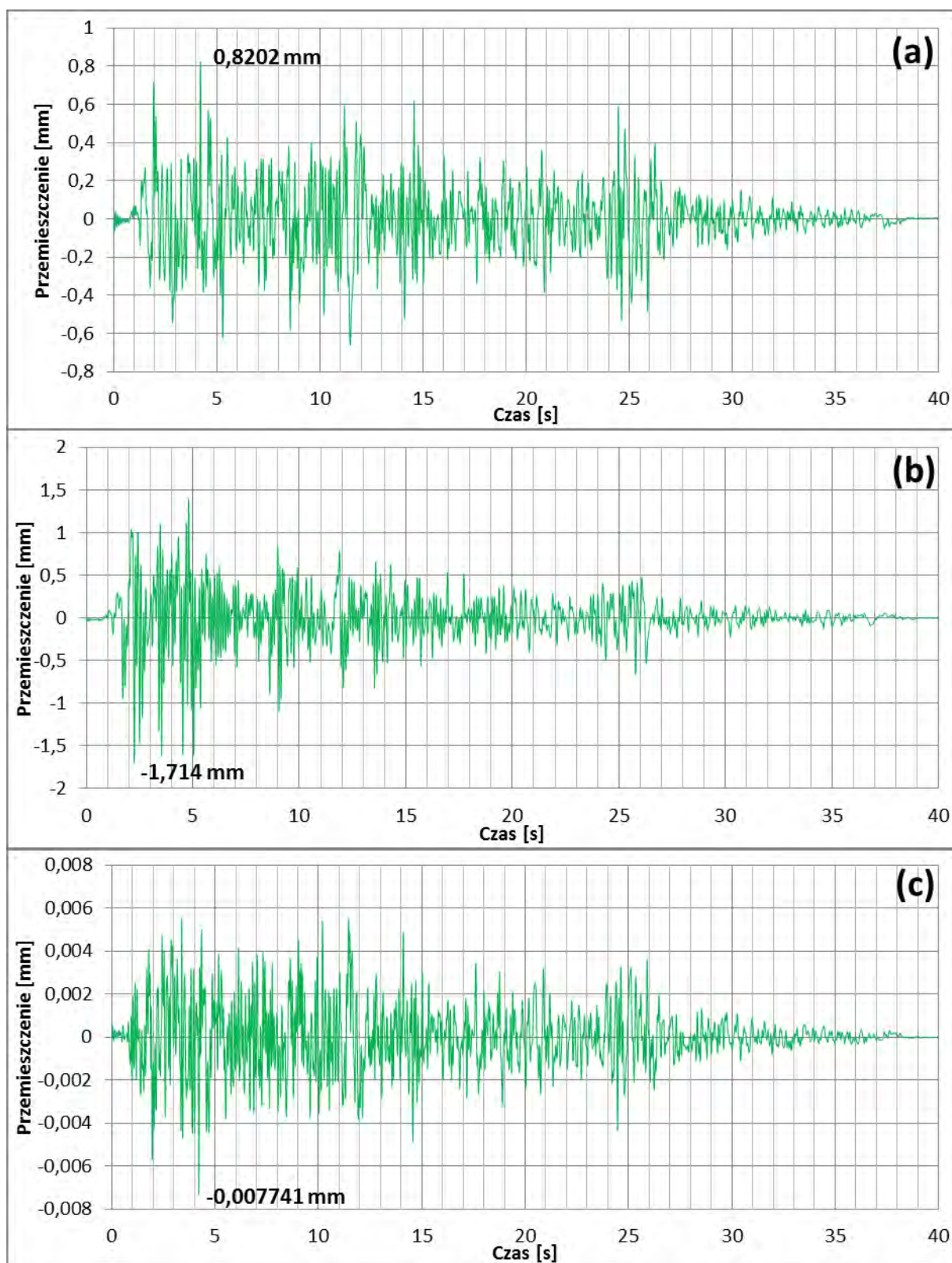
4.3.3 Wyniki analiz dynamicznych dla odłącznika zamkniętego

Do reprezentatywnego przedstawienia wyników nieliniowych analiz dynamicznych wybrano trzy węzły referencyjne (nr 53710, 62229, 65464) modelu numerycznego odpowiadające szczytom obu kolumn oraz punktowi znajdującemu się w środku toru prądowego (na końcu części stykowej toru) (patrz Rys. 4.1). Na Rys. 4.14-4.37 przedstawiono kolejno przebiegi czasowe przemieszczeń oraz przyspieszeń w tych węzłach na trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach dla odłącznika zamkniętego poddanego wymuszeniom dynamicznym na skutek działania trzęsień ziemi El Centro, Kobe, Kushiro oraz San Fernando. Dodatkowo, na Rys. 4.38-4.41 pokazano mapy maksymalnych naprężeń dla każdego wymuszenia sejsmicznego.

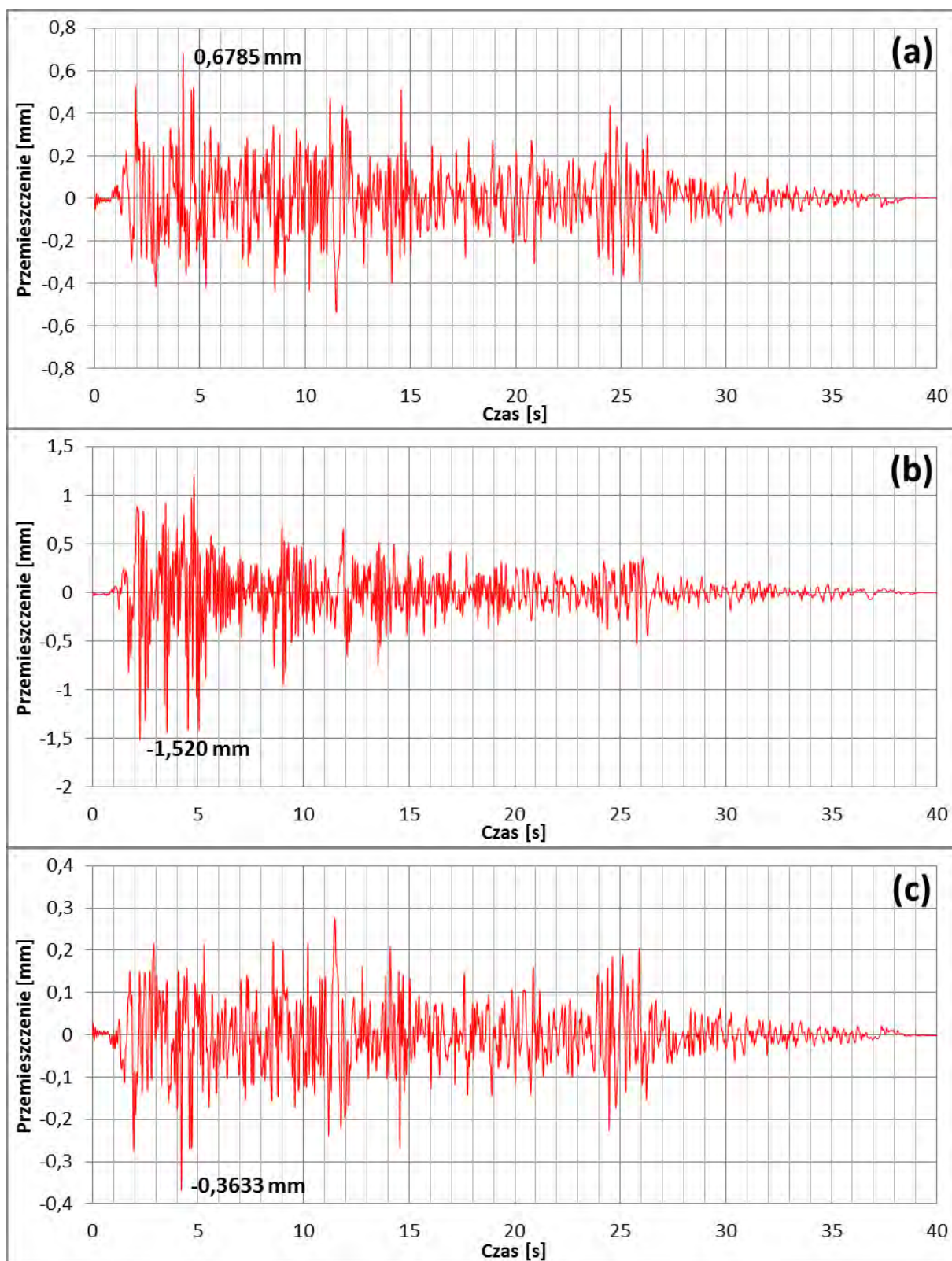
4.3.3.1 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi El Centro



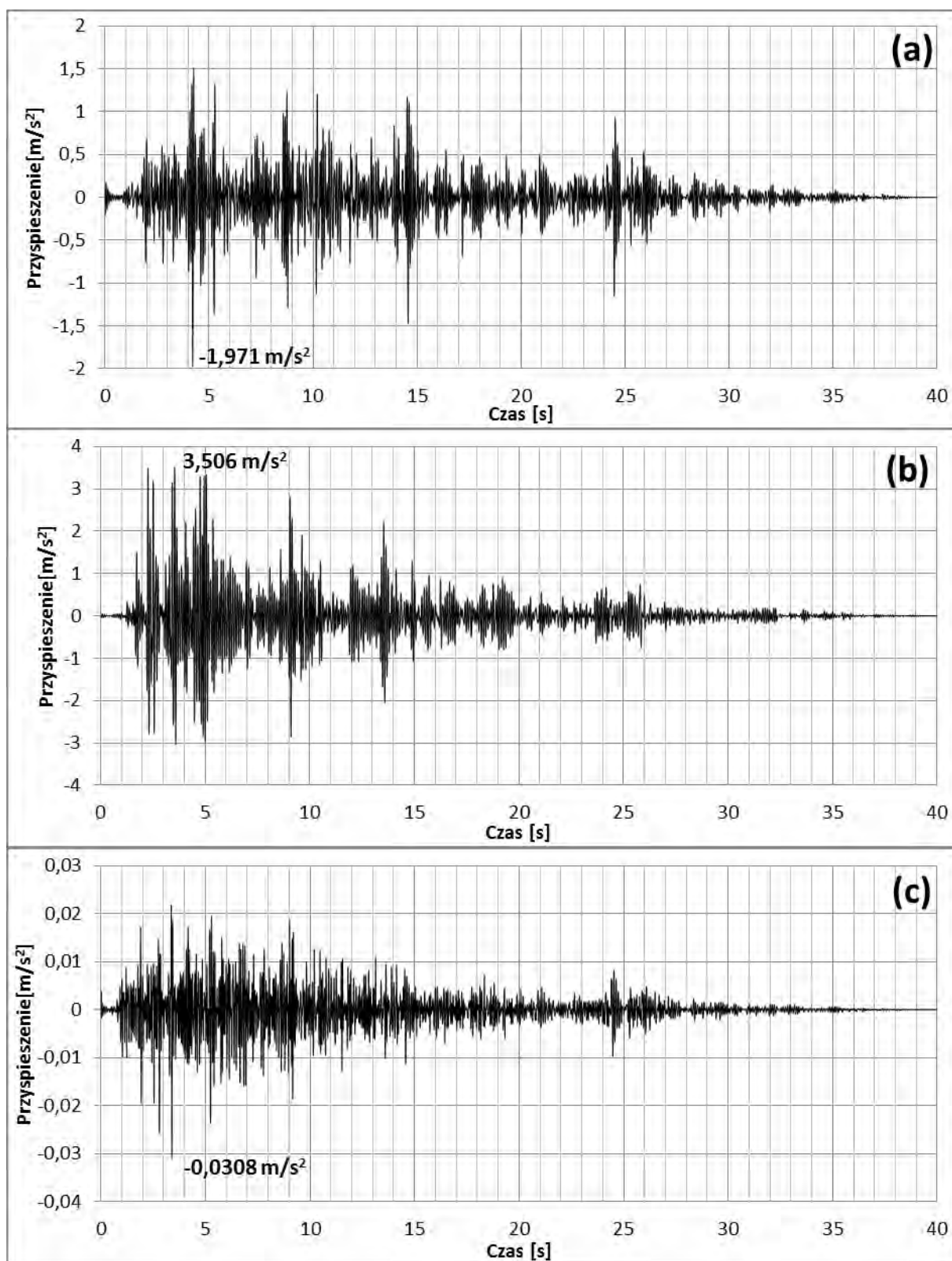
Rys. 4.14. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



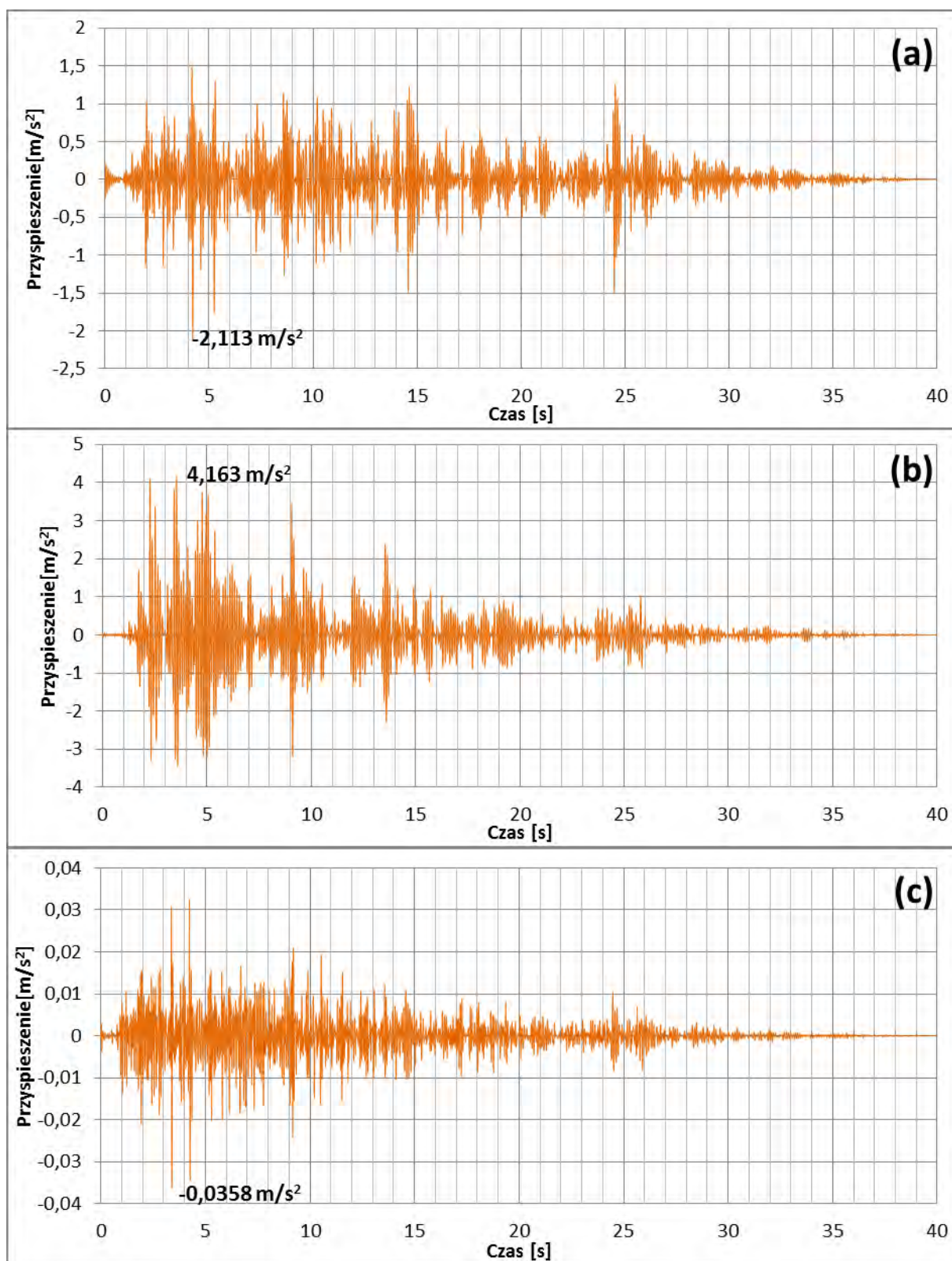
Rys. 4.15. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



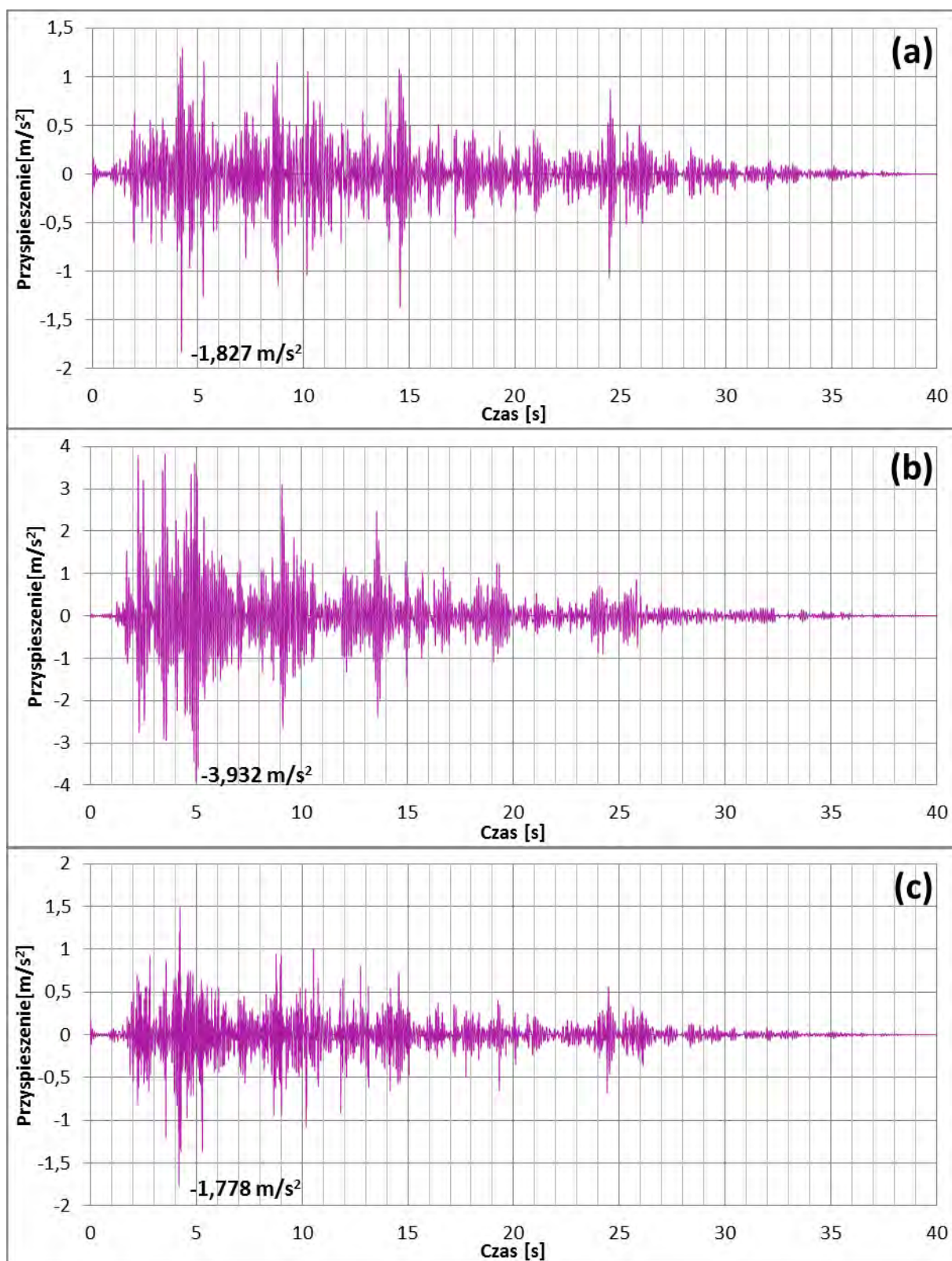
Rys. 4.16. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.17. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

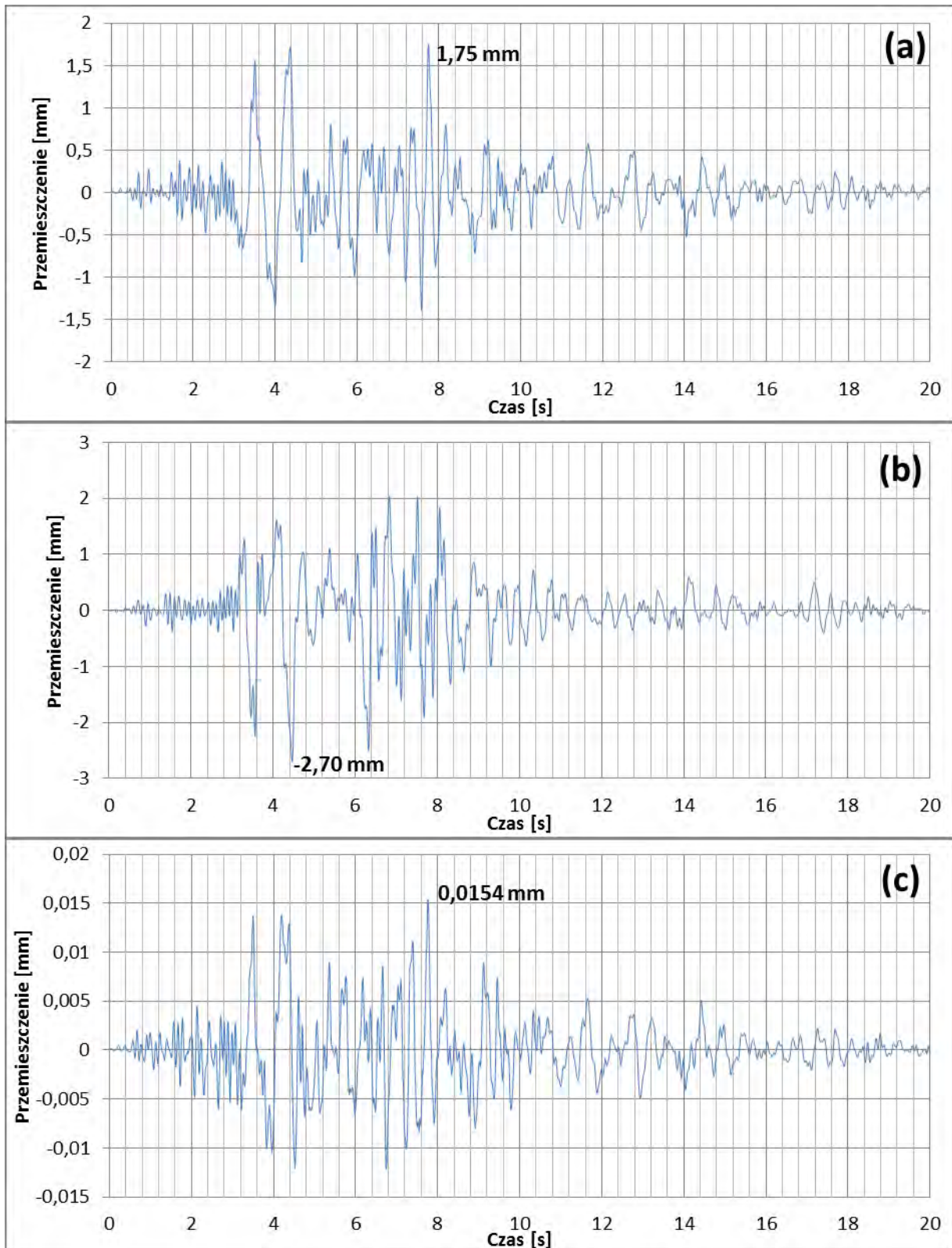


Rys. 4.18. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

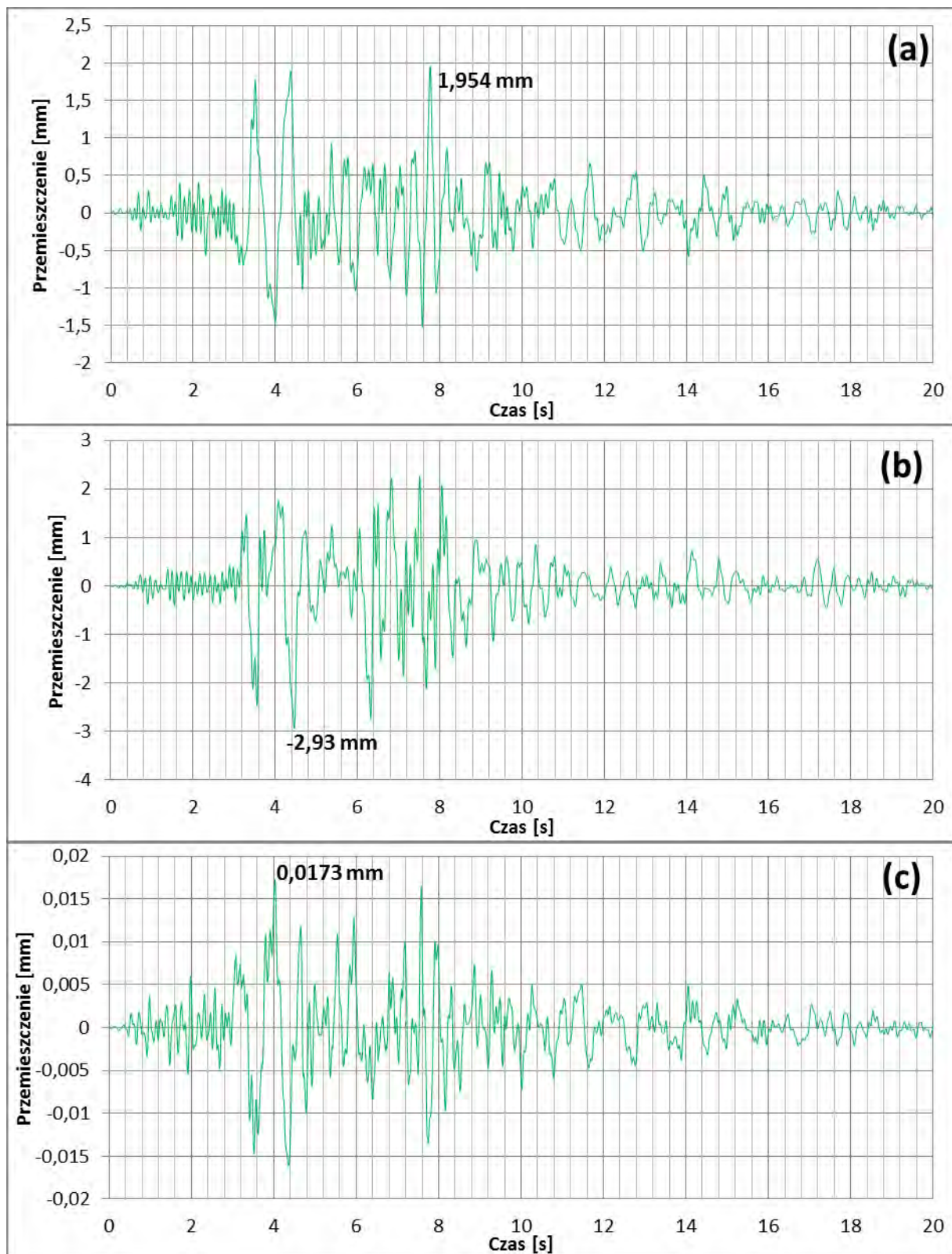


Rys. 4.19. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

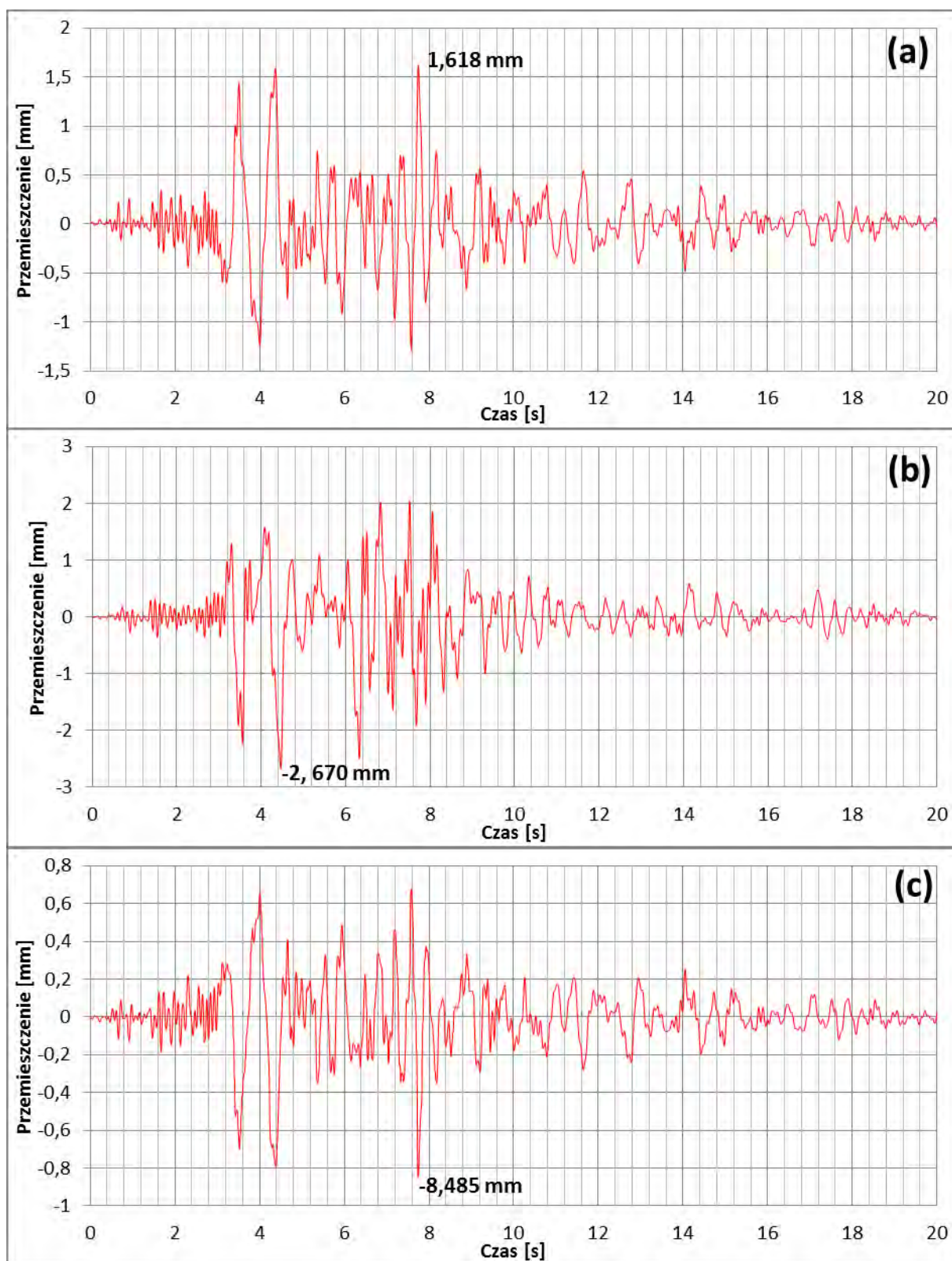
4.3.3.2 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kobe



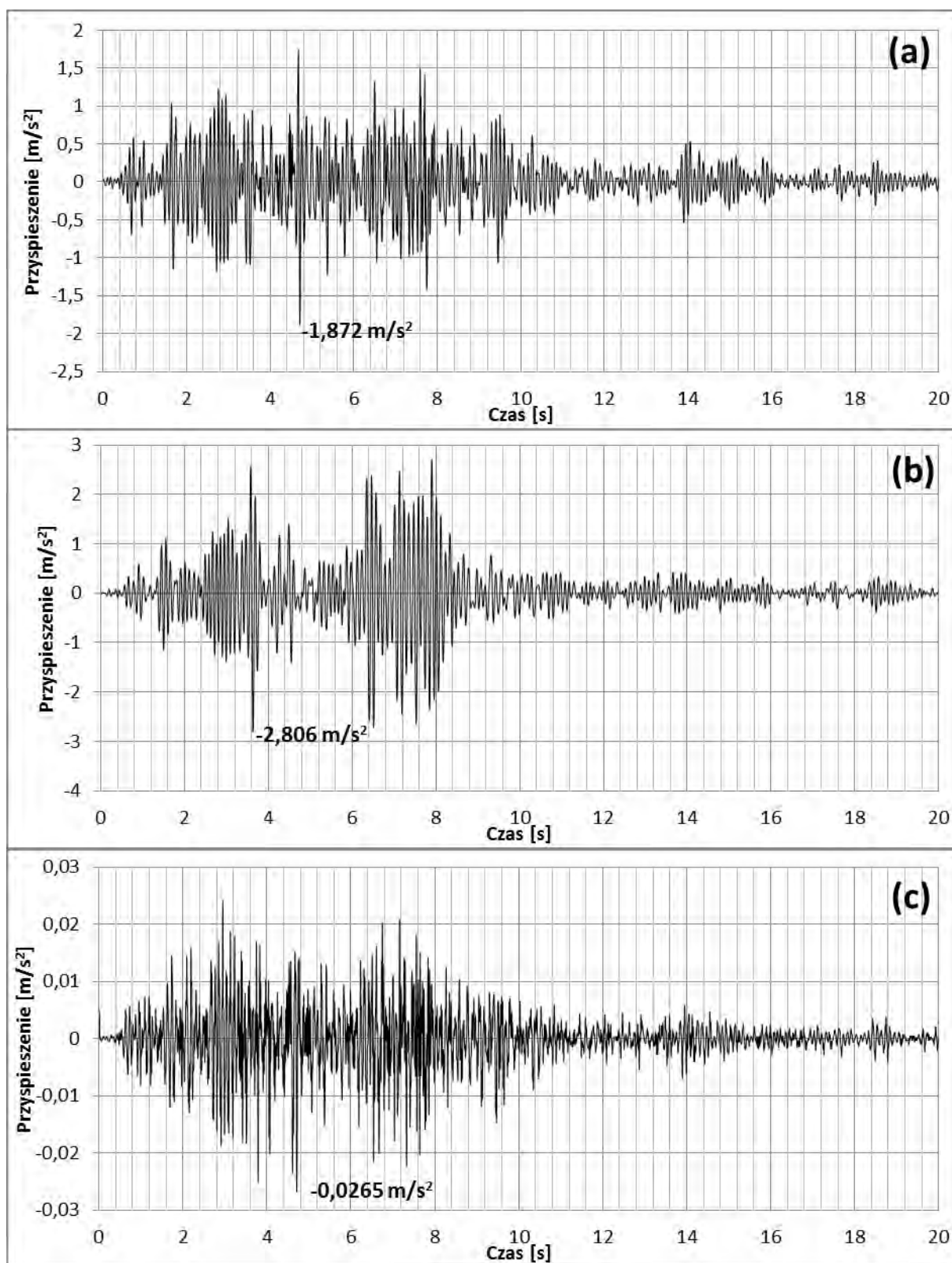
Rys. 4.20. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



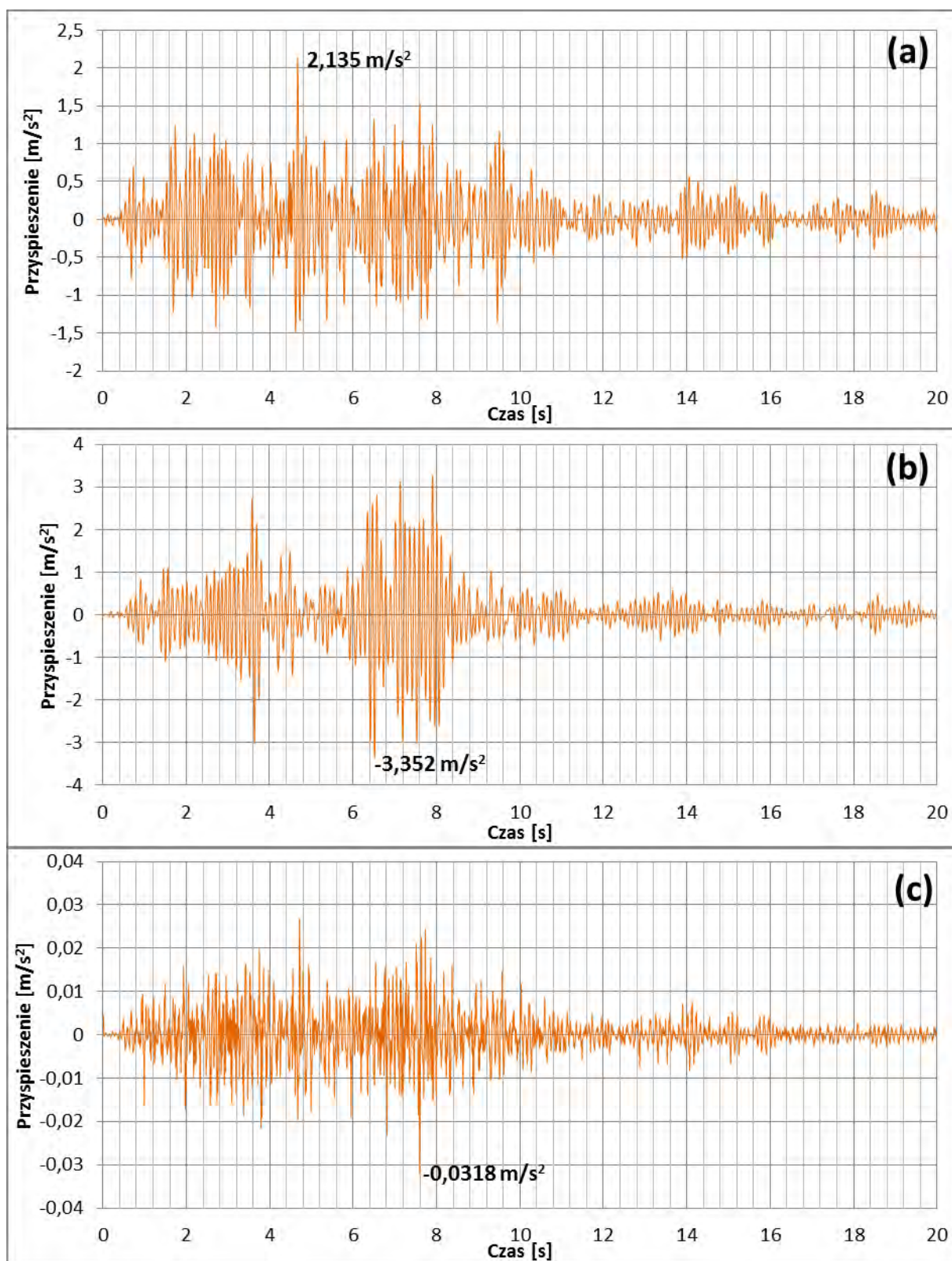
Rys. 4.21. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



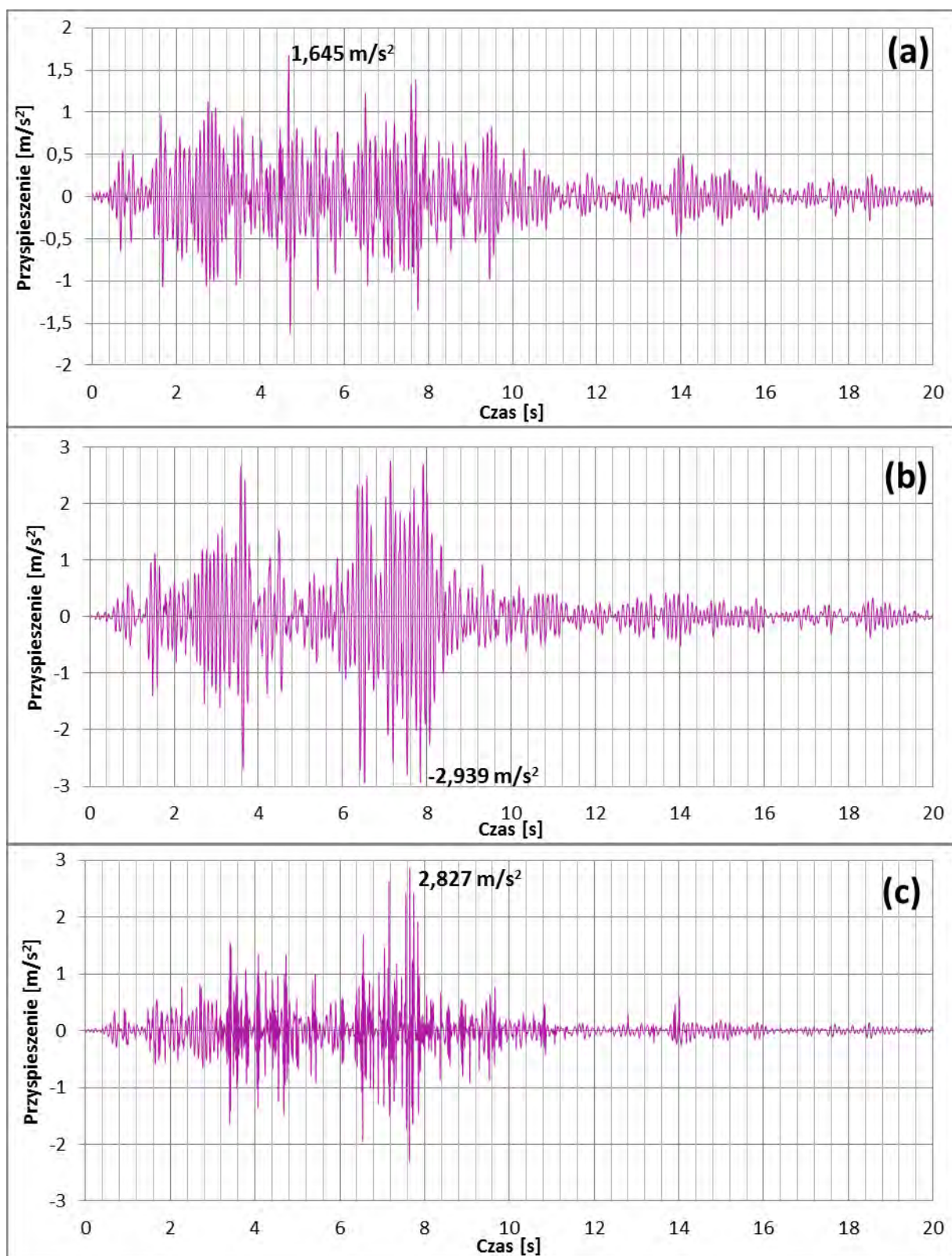
Rys. 4.22. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.23. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

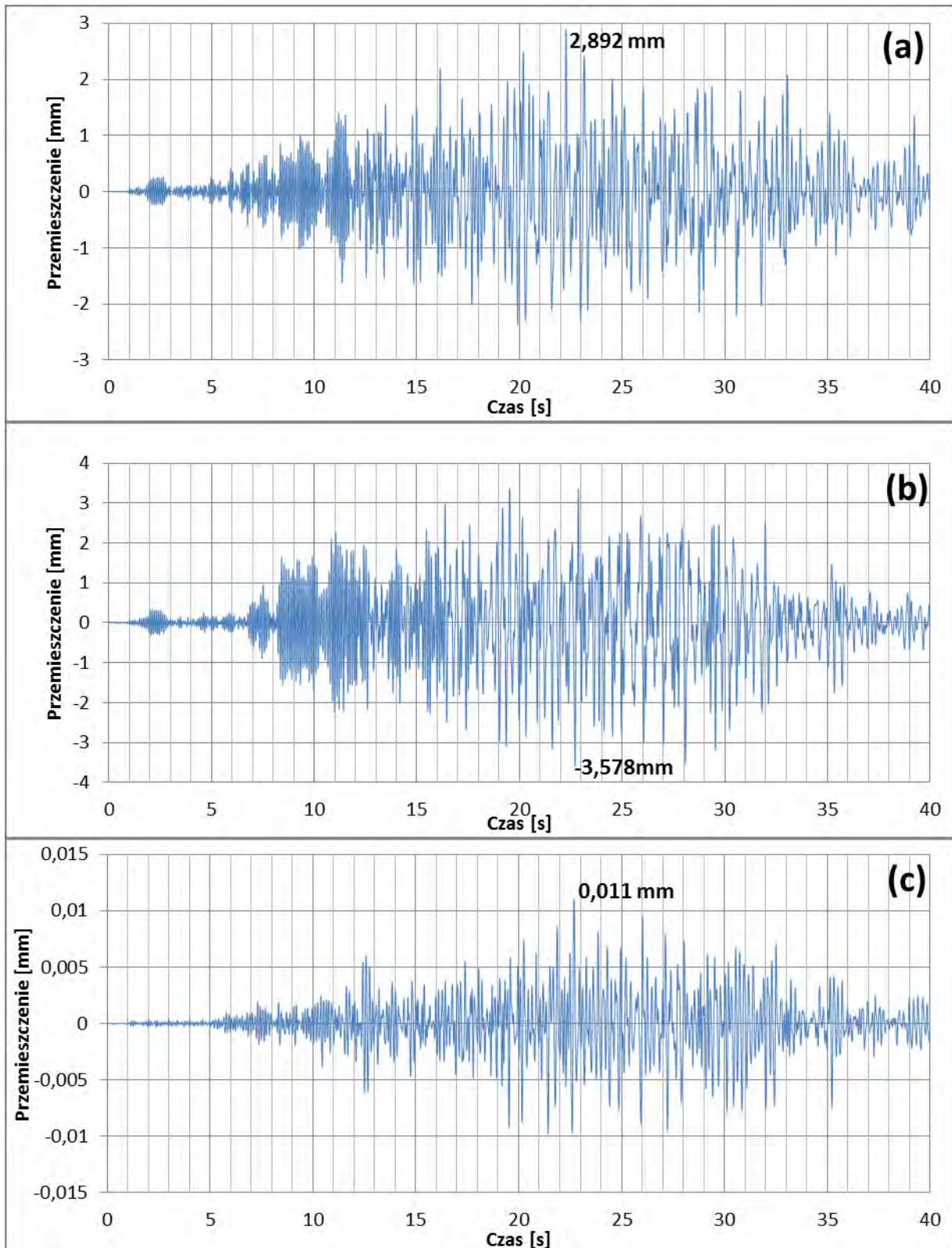


Rys. 4.24. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

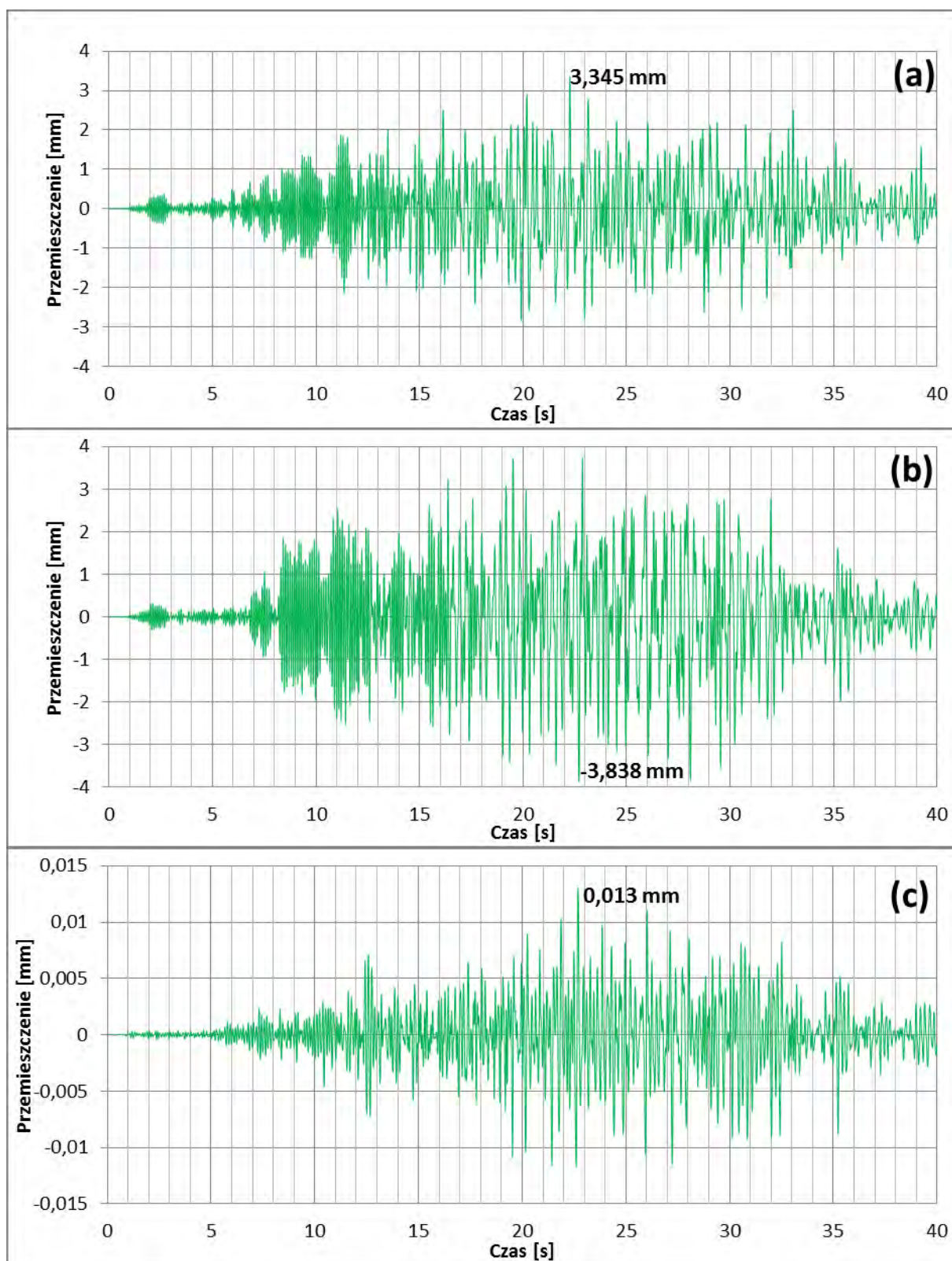


Rys. 4.25. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

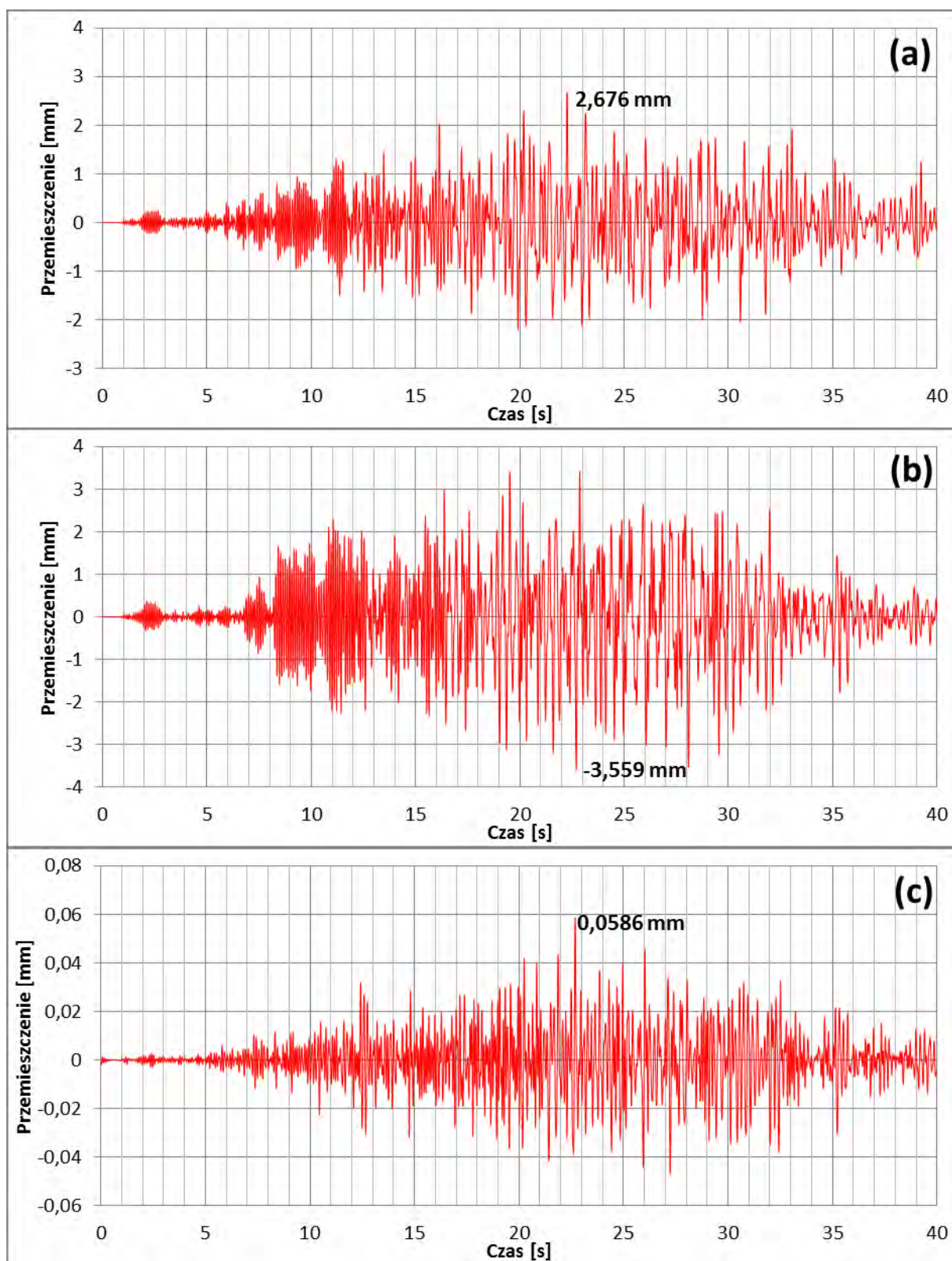
4.3.3 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kushiro



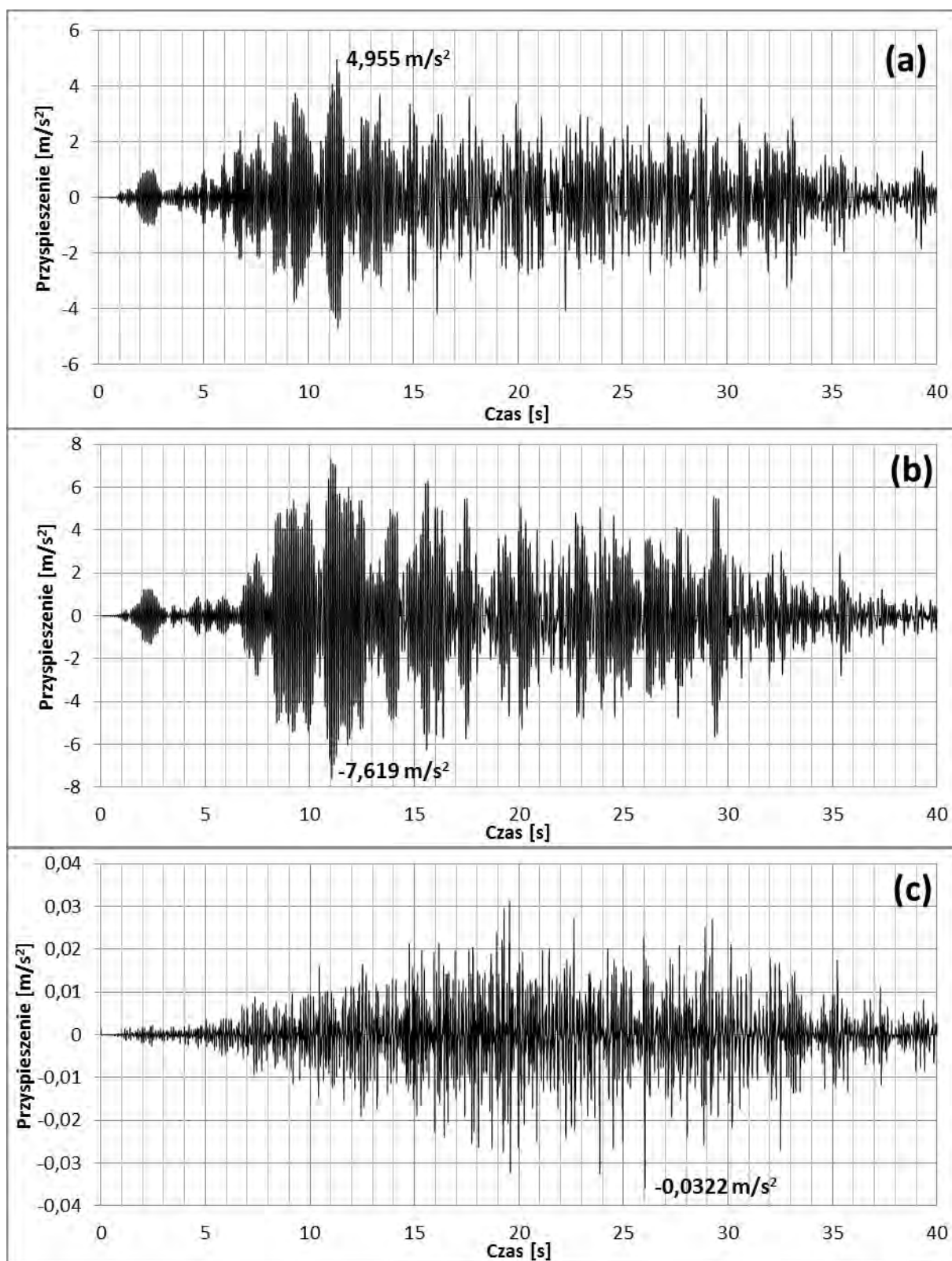
Rys. 4.26. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



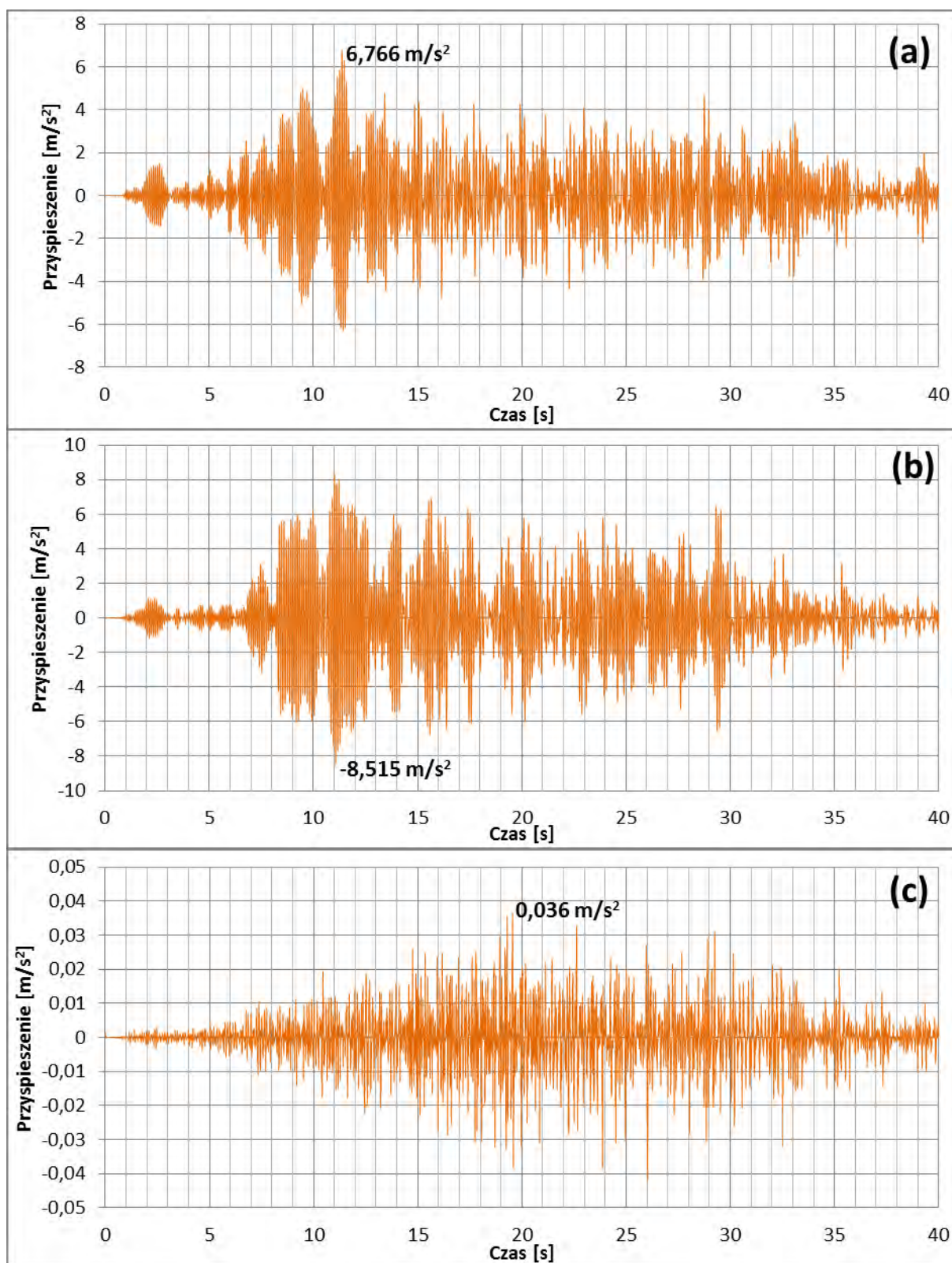
Rys. 4.27. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



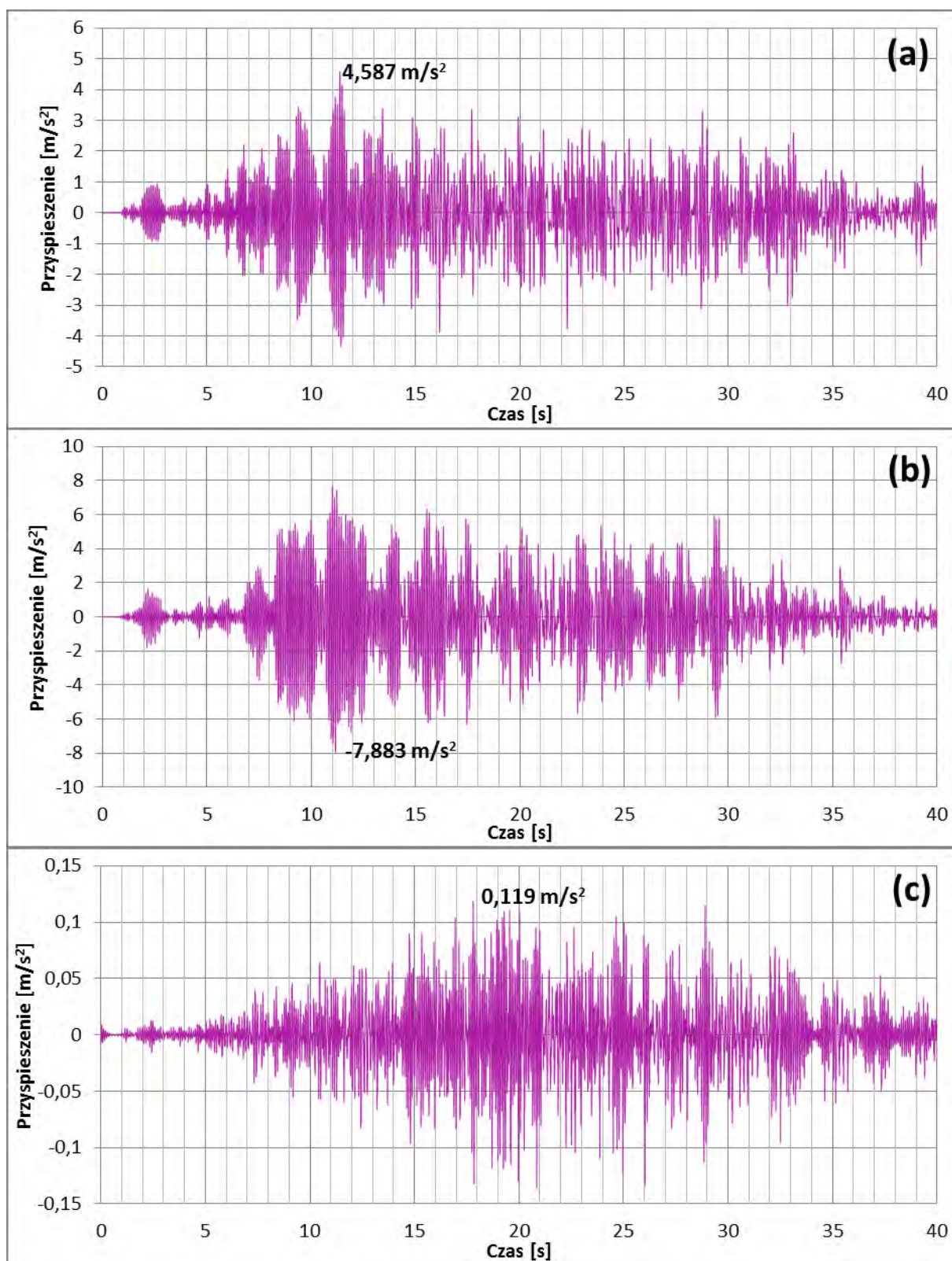
Rys. 4.28. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.29. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Koshiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

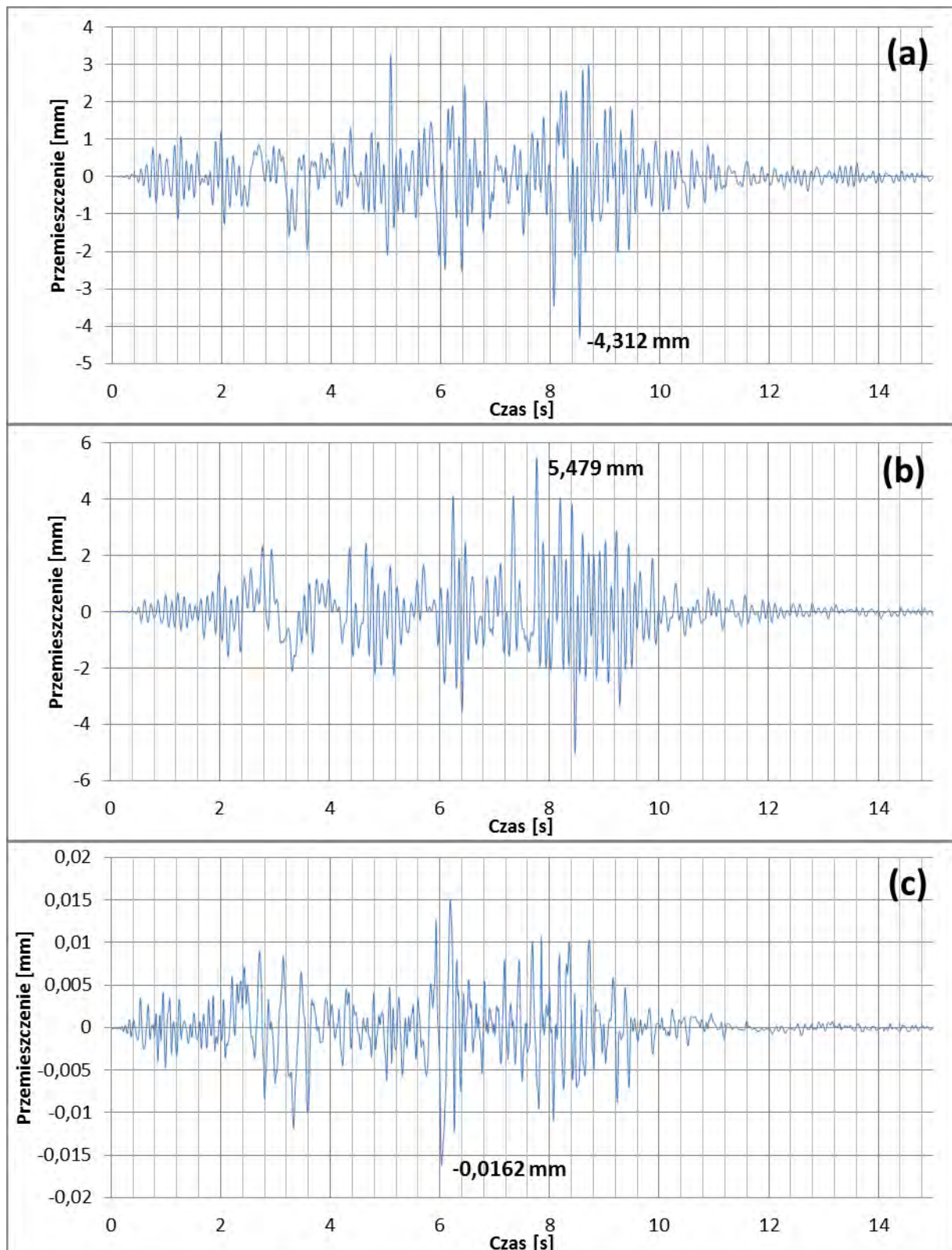


Rys. 4.30. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Koshiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

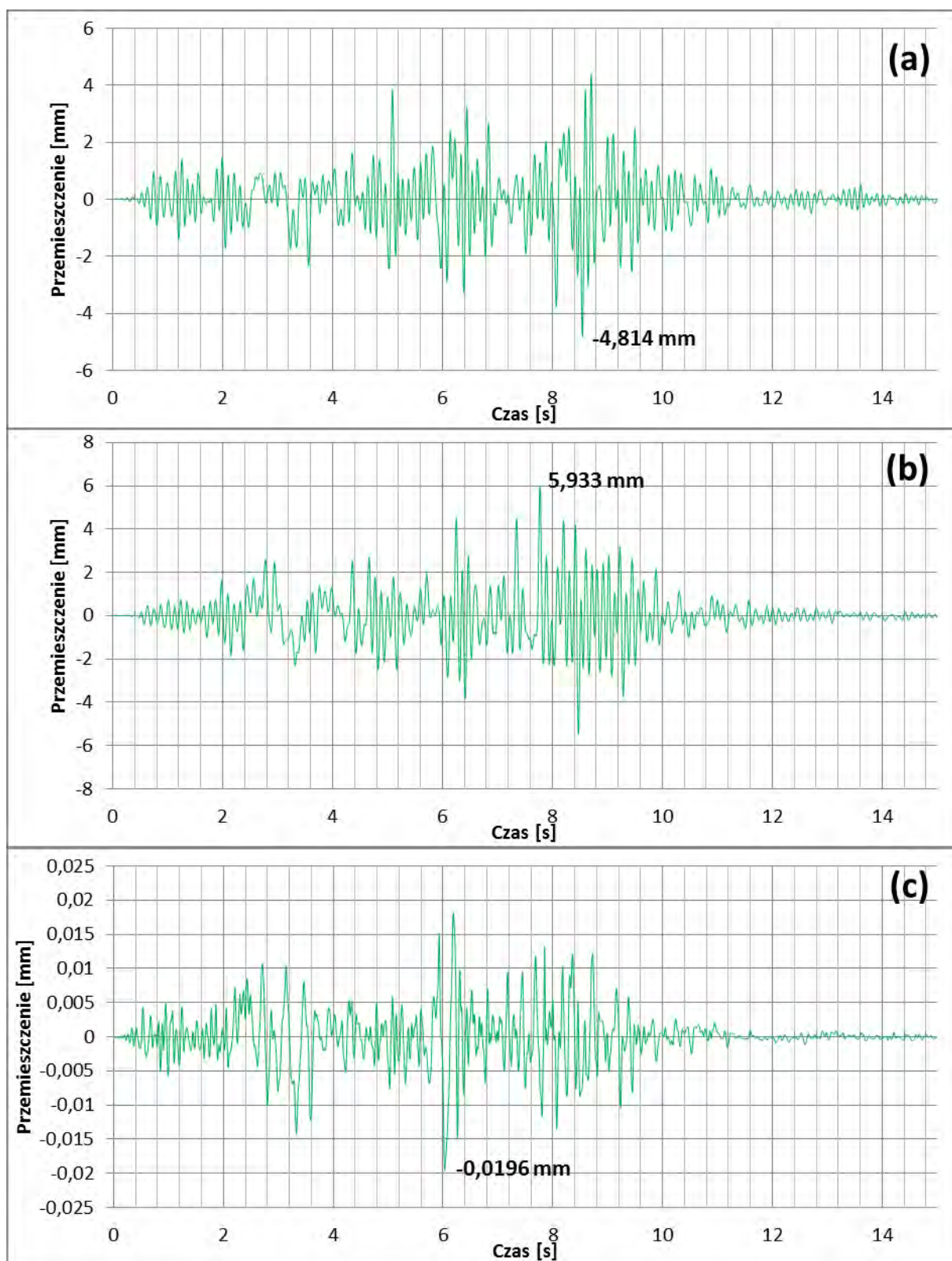


Rys. 4.31. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

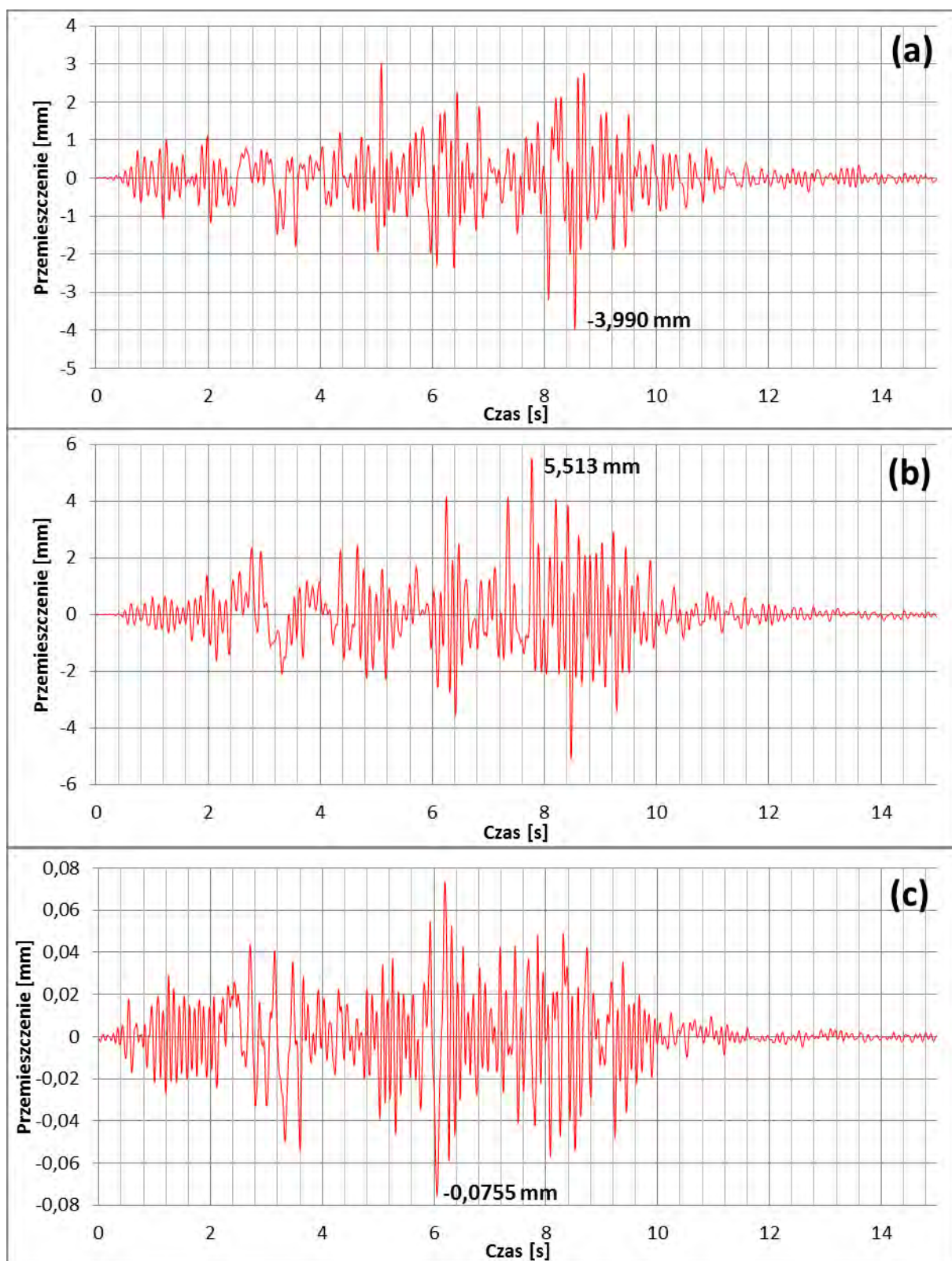
4.3.3.4 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi San Fernando



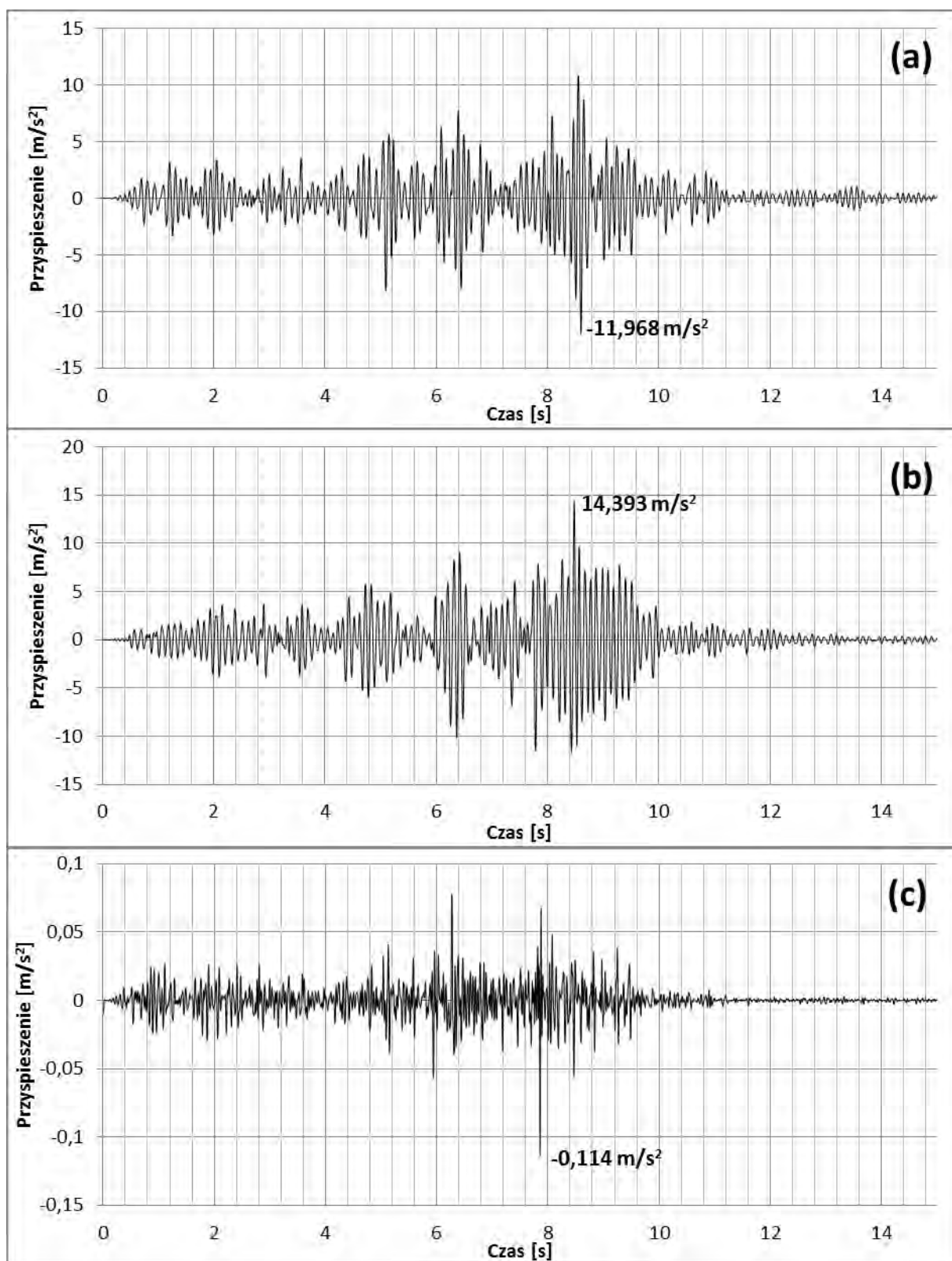
Rys. 4.32. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



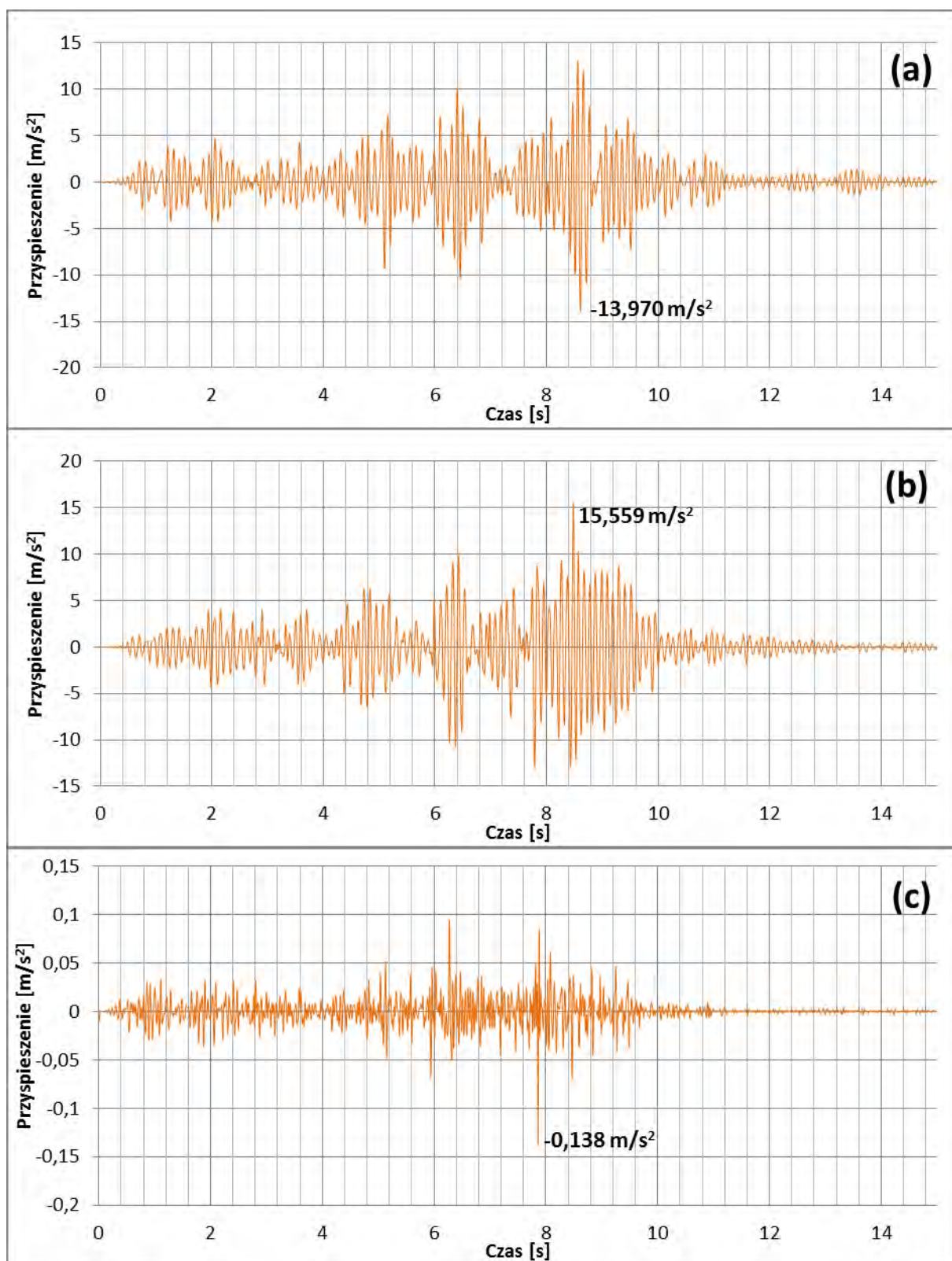
Rys. 4.33. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



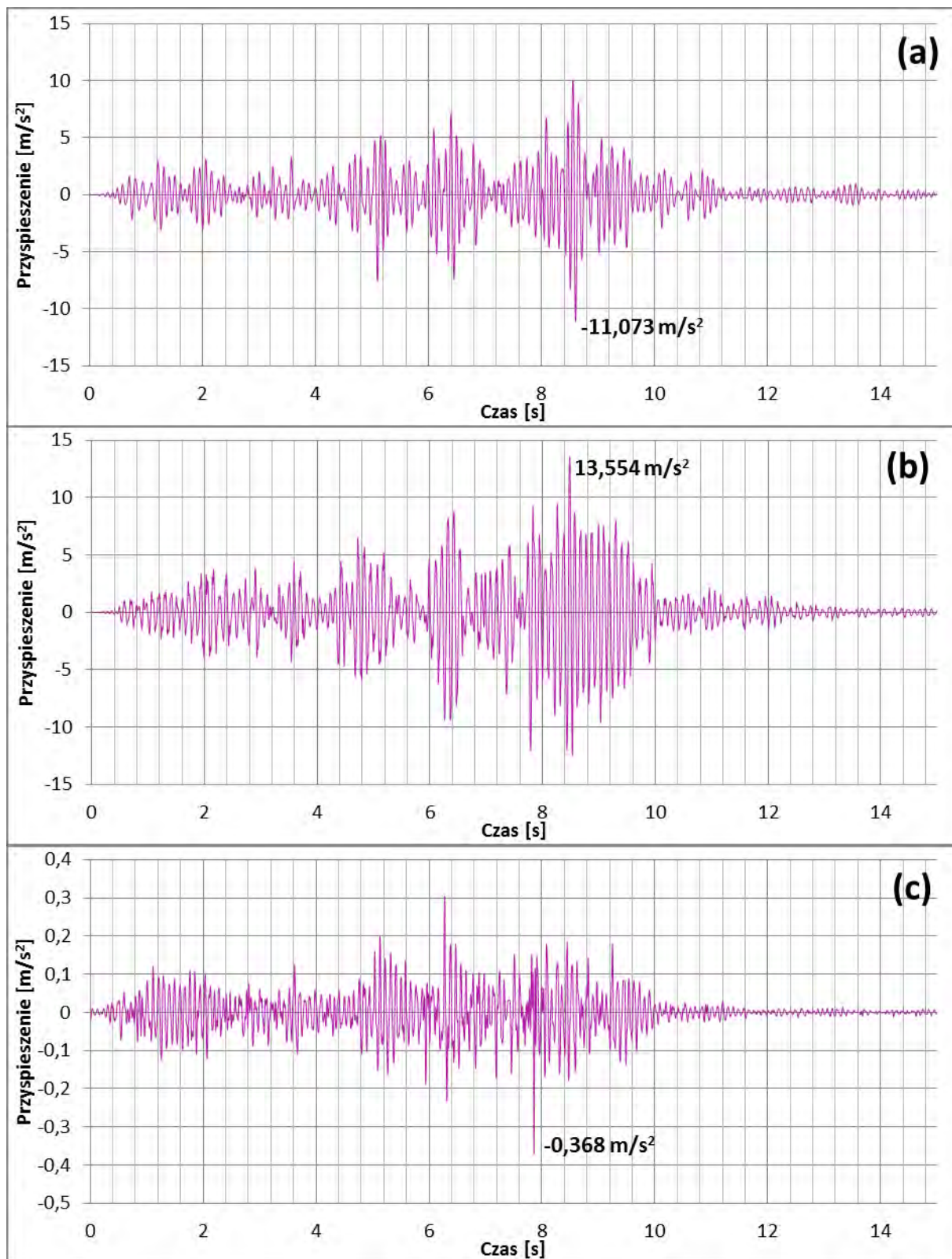
Rys. 4.34. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.35. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

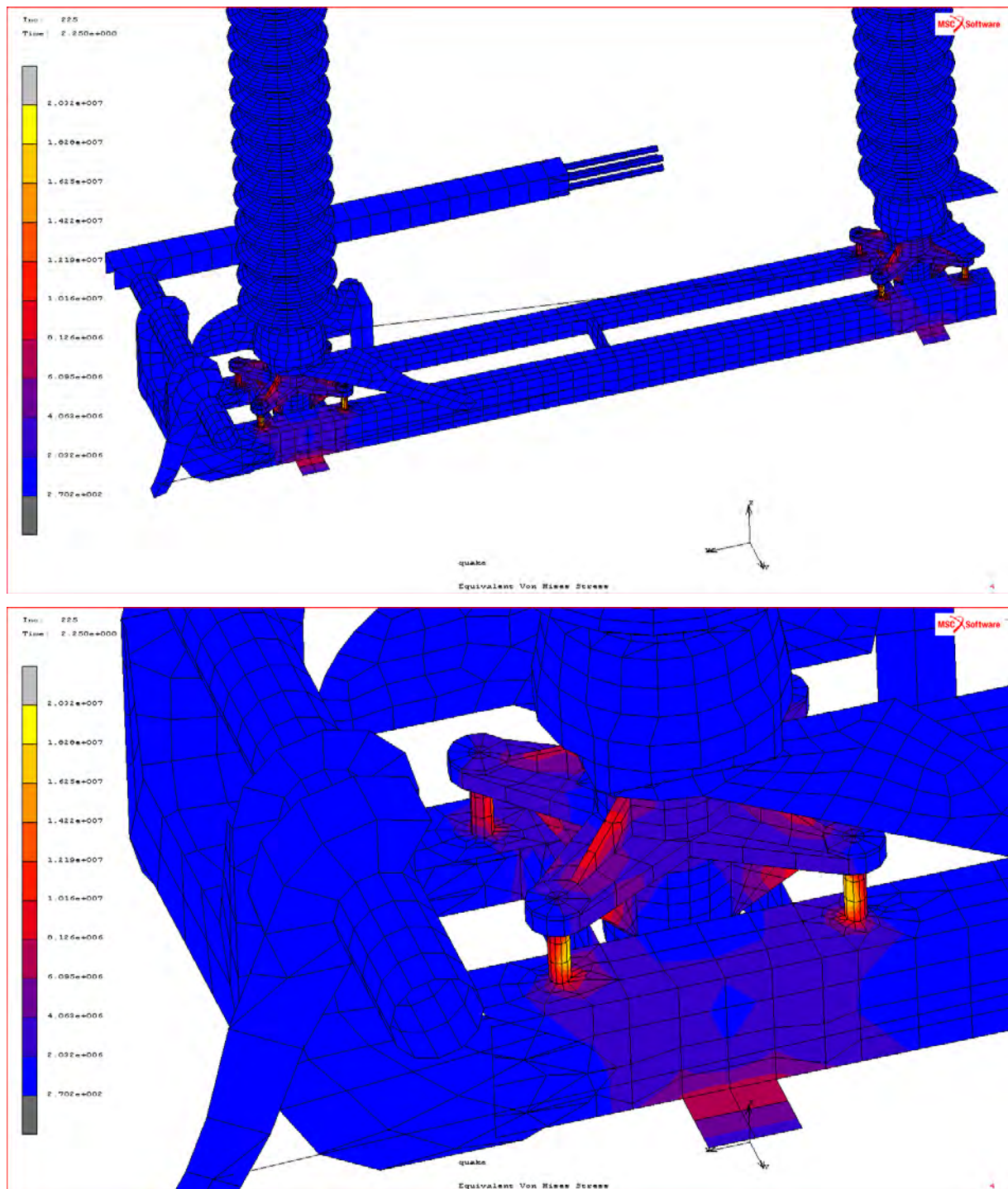


Rys. 4.36. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

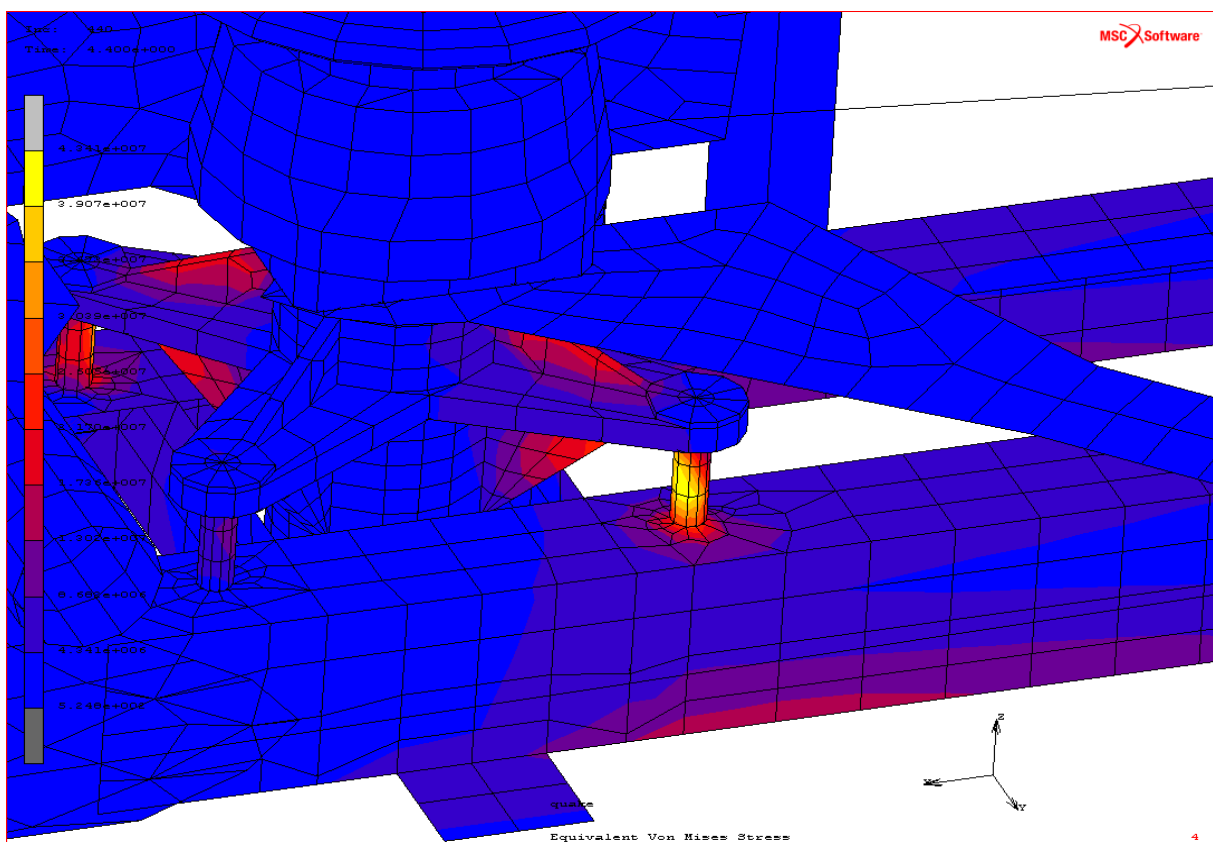
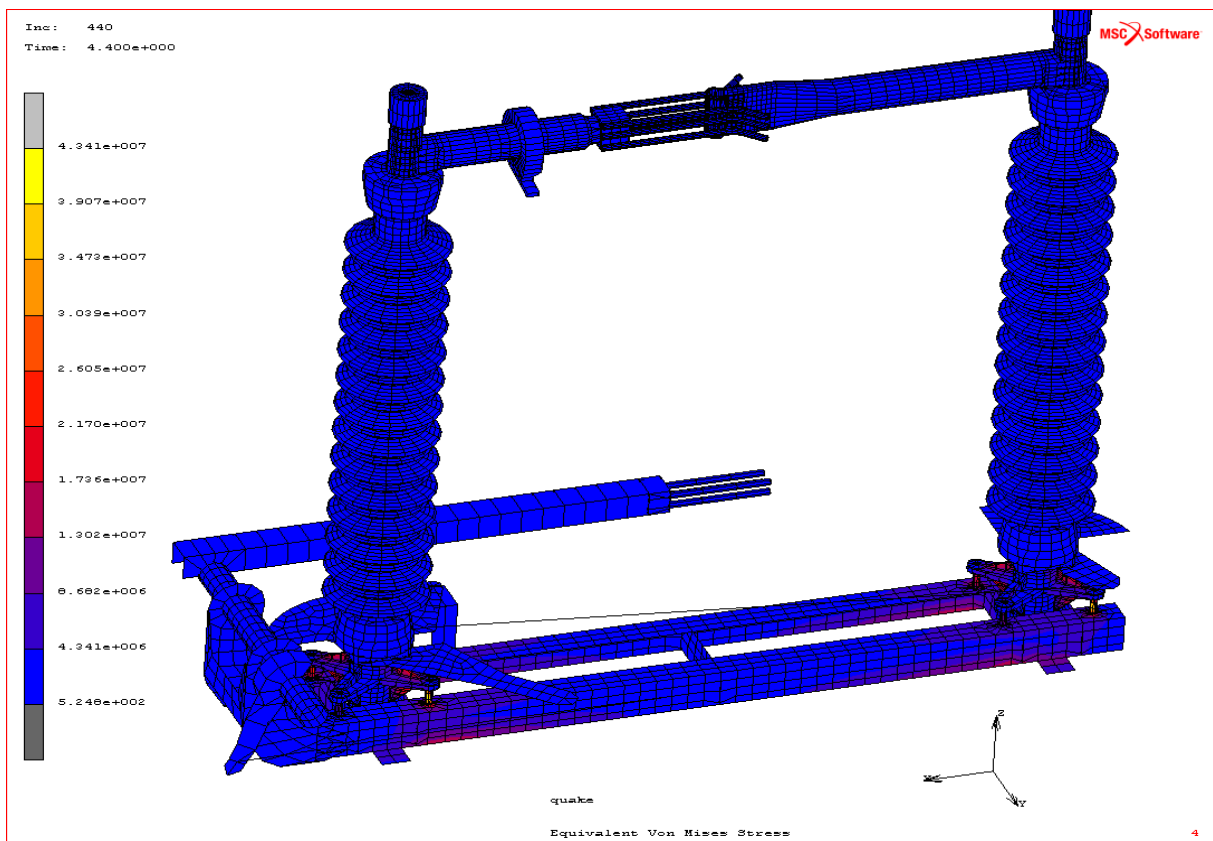


Rys. 4.37. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika zamkniętego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

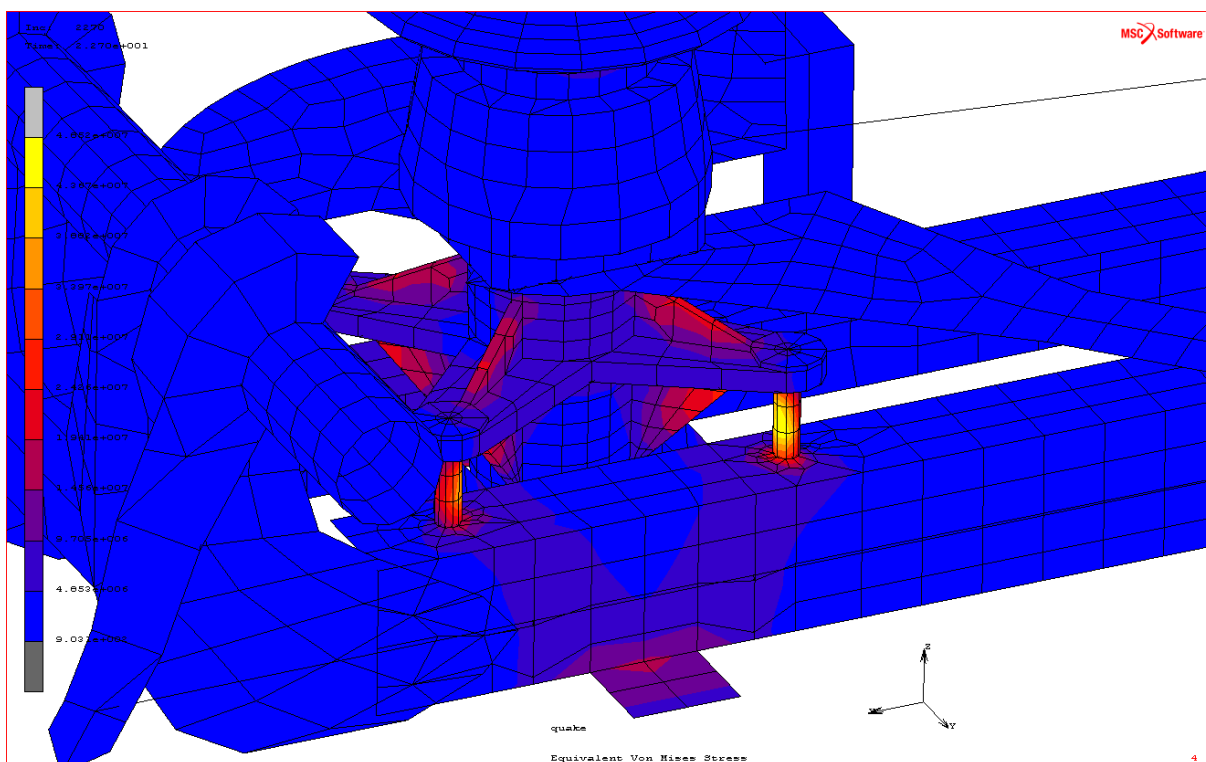
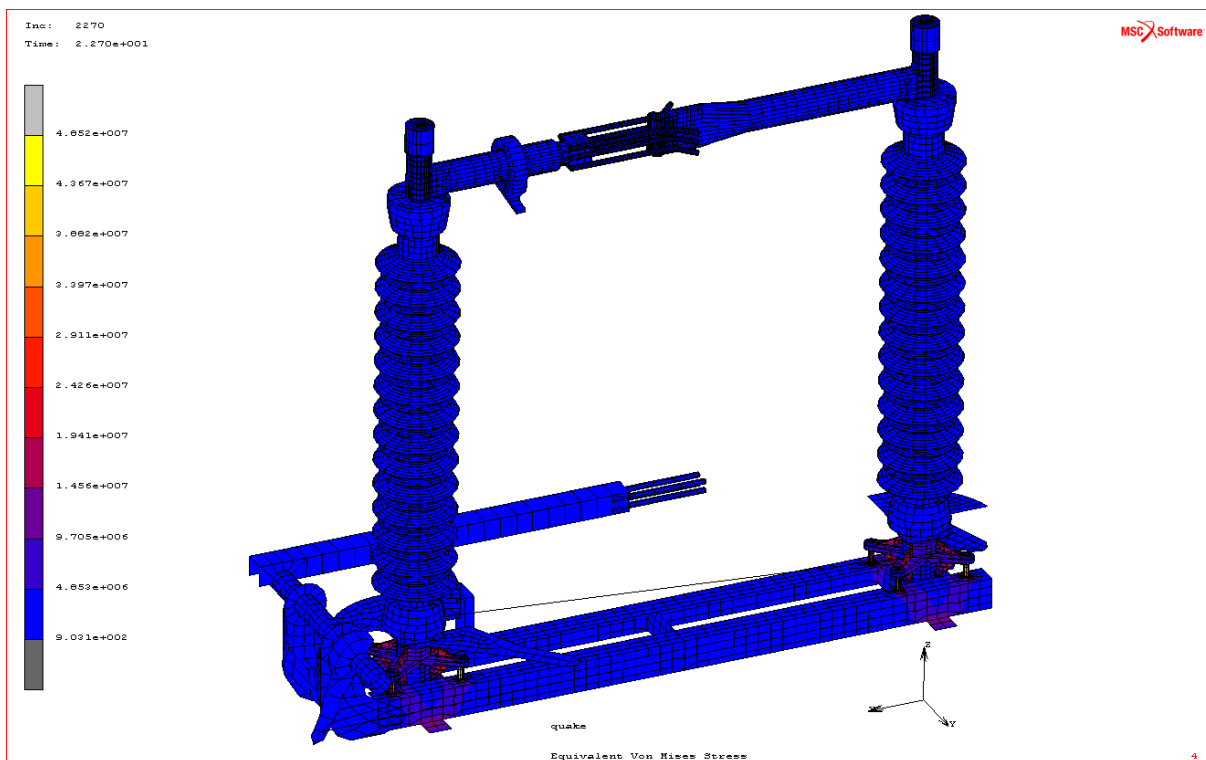
4.3.3.5 Mapy maksymalnych naprężeń



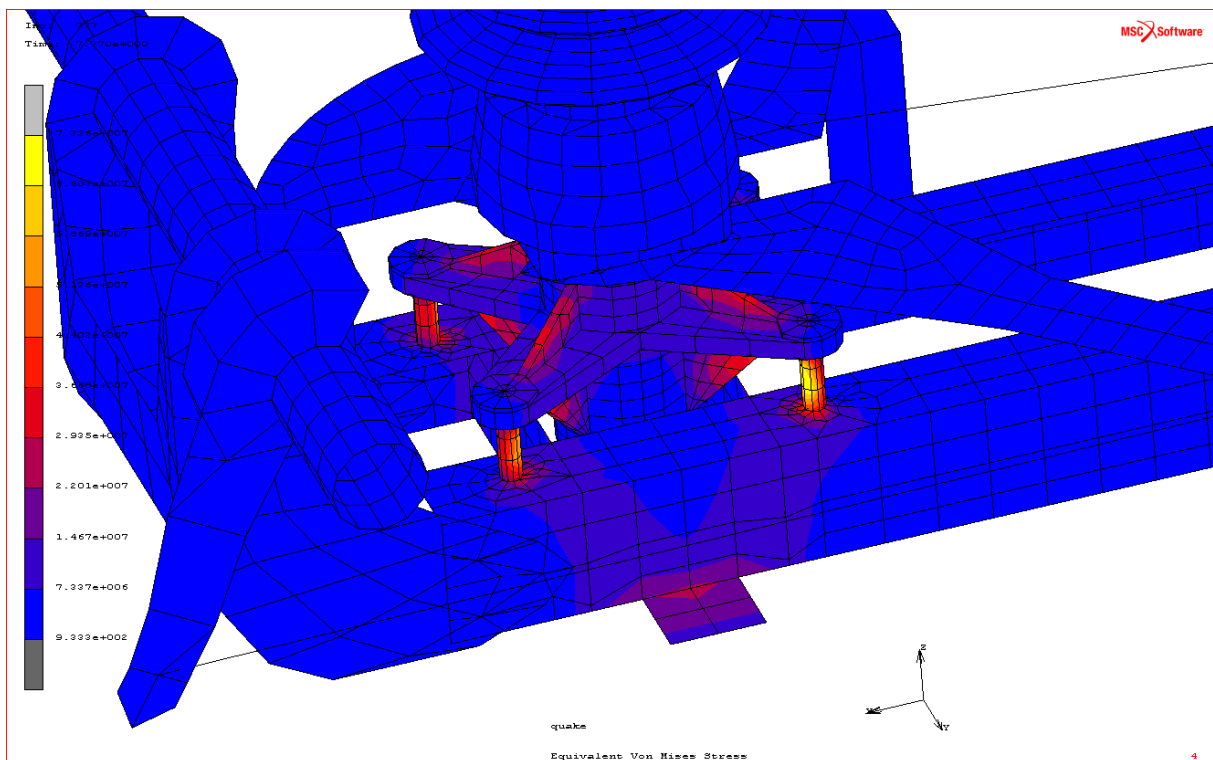
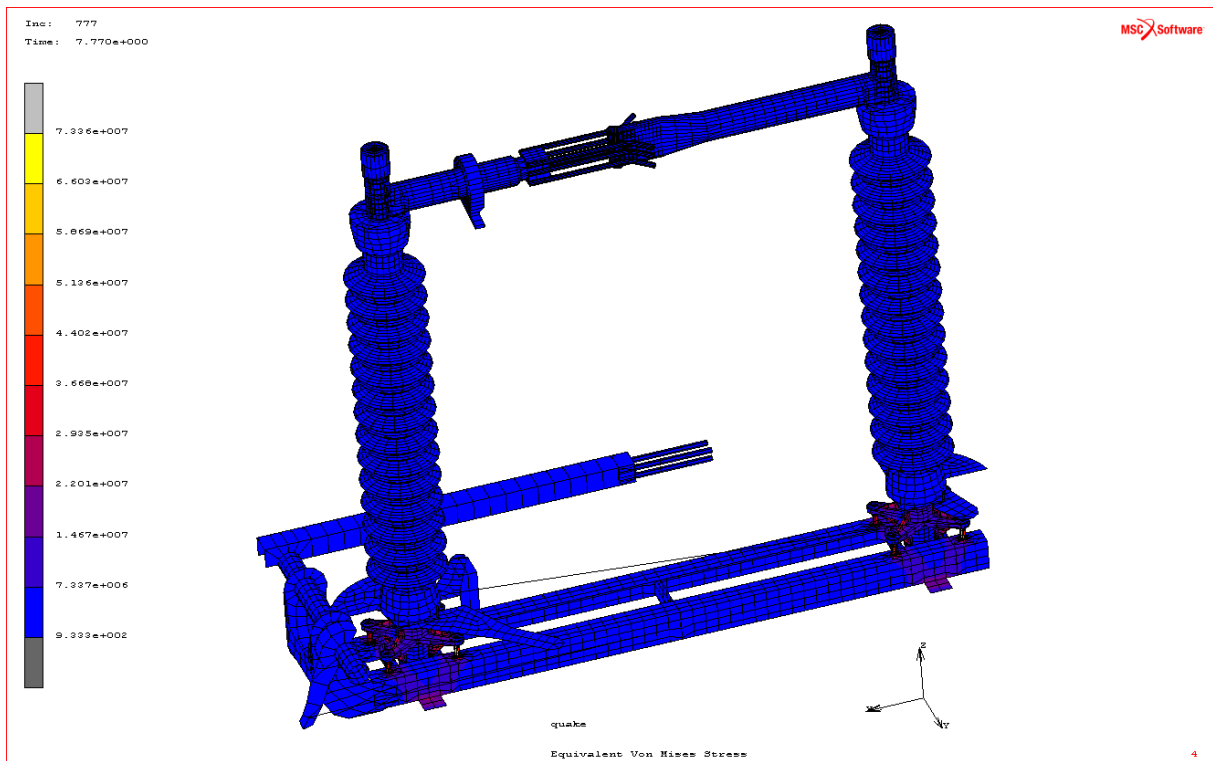
Rys. 4.38. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi El Centro dla odłącznika zamkniętego.



Rys. 4.39. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi Kobe dla odłącznika zamkniętego.



Rys. 4.40. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi Kushiro dla odłącznika zamkniętego.



Rys. 4.41. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi San Fernando dla odłącznika zamkniętego.

Wyniki nieliniowych analiz numerycznych otrzymane dla odłącznika zamkniętego wskazują (zob. Rys. 4.14-4.41), iż oddziaływania dynamiczne powstające podczas różnych trzęsień ziemi mogą wzbudzić analizowaną konstrukcję do drgań o znacznych amplitudach oraz powodować powstanie dużych wartości naprężeń w poszczególnych jej elementach. Z pośród czterech analizowanych przebiegów czasowych wstrząsów sejsmicznych najwyższe poziomy odpowiedzi wystąpiły dla trzęsienia ziemi San Fernando.

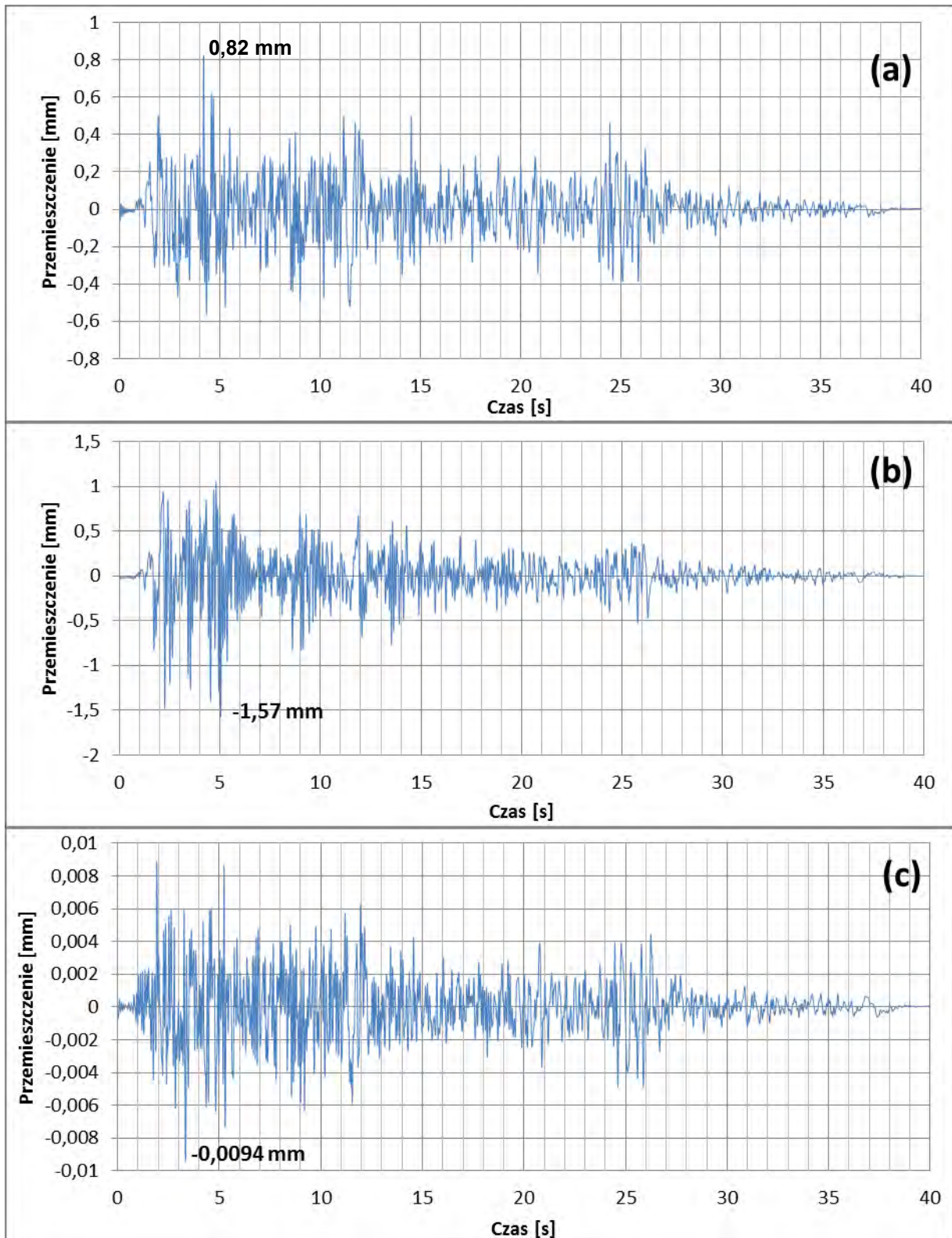
Wyniki przedstawione na Rys. 4.14-4.37 wskazują, iż największe amplitudy drgań w kierunkach poziomych X i Y otrzymano na szczycie kolumny II (węzeł nr 62229). Ekstremalne wartości przemieszczeń oraz przyspieszeń dla tego punktu są o 7,2-36,5% większe niż analogiczne wartości otrzymane dla węzła nr 53710 znajdującego się na szczycie kolumny I. Jednocześnie, największe wartości ekstremalne przemieszczeń oraz przyspieszeń w kierunku pionowym Z dla analizowanych wstrząsów sejsmicznych otrzymano dla węzła nr 65464 zlokalizowanego w środku toru prądowego.

Z kolei, największe wartości naprężeń, wywołane analizowanymi trzęsieniami ziemi, wystąpiły w ramie podstawy odłącznika, w miejscach połączenia pomiędzy ramą podstawy a kolumnami (szczególnie w śrubach łączących) oraz w dolnych częściach kolumn (zob. Rys. 4.38-4.41). W żadnym punkcie jednak nie doszło do przekroczenia granicy plastyczności w metalowych częściach konstrukcji ani do kruchego pęknięcia części ceramicznych.

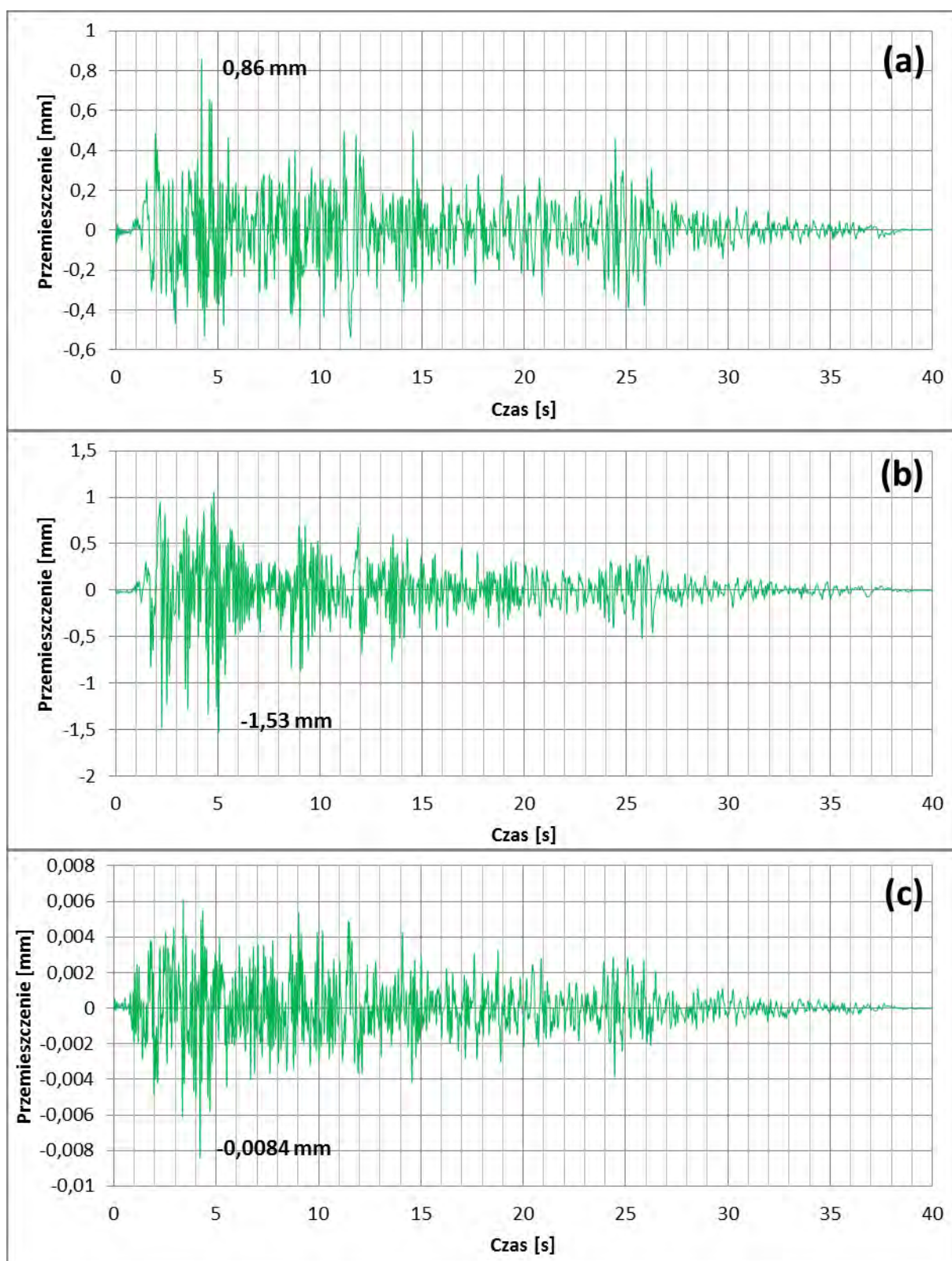
4.3.4 Wyniki analizy dynamicznej dla odłącznika otwartego

Podobnie jak w przypadku odłącznika w konfiguracji zamkniętej, do reprezentatywnego przedstawienia wyników nieliniowych analiz dynamicznych wybrano trzy węzły referencyjne (nr 53710, 62229, 65464) modelu numerycznego odpowiadające szczytom obu kolumn oraz punktowi znajdującemu się w środku toru prądowego (na końcu części stykowej toru) (zob. Rys. 4.3). Na Rys. 4.42-4.65 przedstawiono kolejno przebiegi czasowe przemieszczeń oraz przyspieszeń w tych węzłach na trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach dla odłącznika otwartego poddanego wymuszeniom dynamicznym na skutek działania trzęsień ziemi El Centro, Kobe, Kushiro oraz San Fernando. Dodatkowo, na Rys. 4.66-4.69 pokazano mapy maksymalnych naprężeń dla każdego wymuszenia sejsmicznego, zaś na Rys. 4.70 przedstawiono mapę maksymalnych odkształceń plastycznych powstałych podczas trzęsienia ziemi San Fernando (trzęsienie to było jedynym, podczas którego doszło do uplastycznienia elementów konstrukcji).

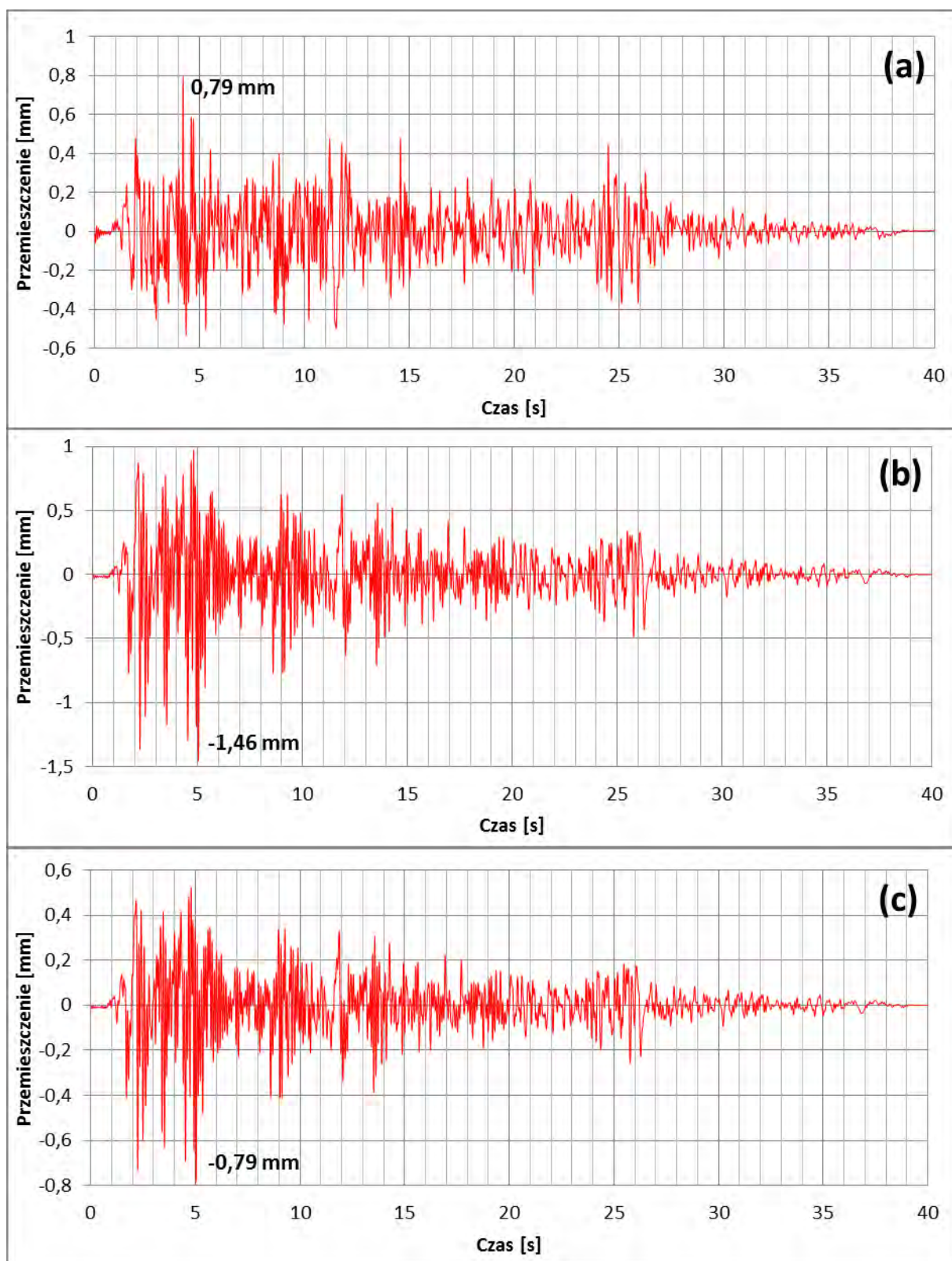
4.3.4.1 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi El Centro



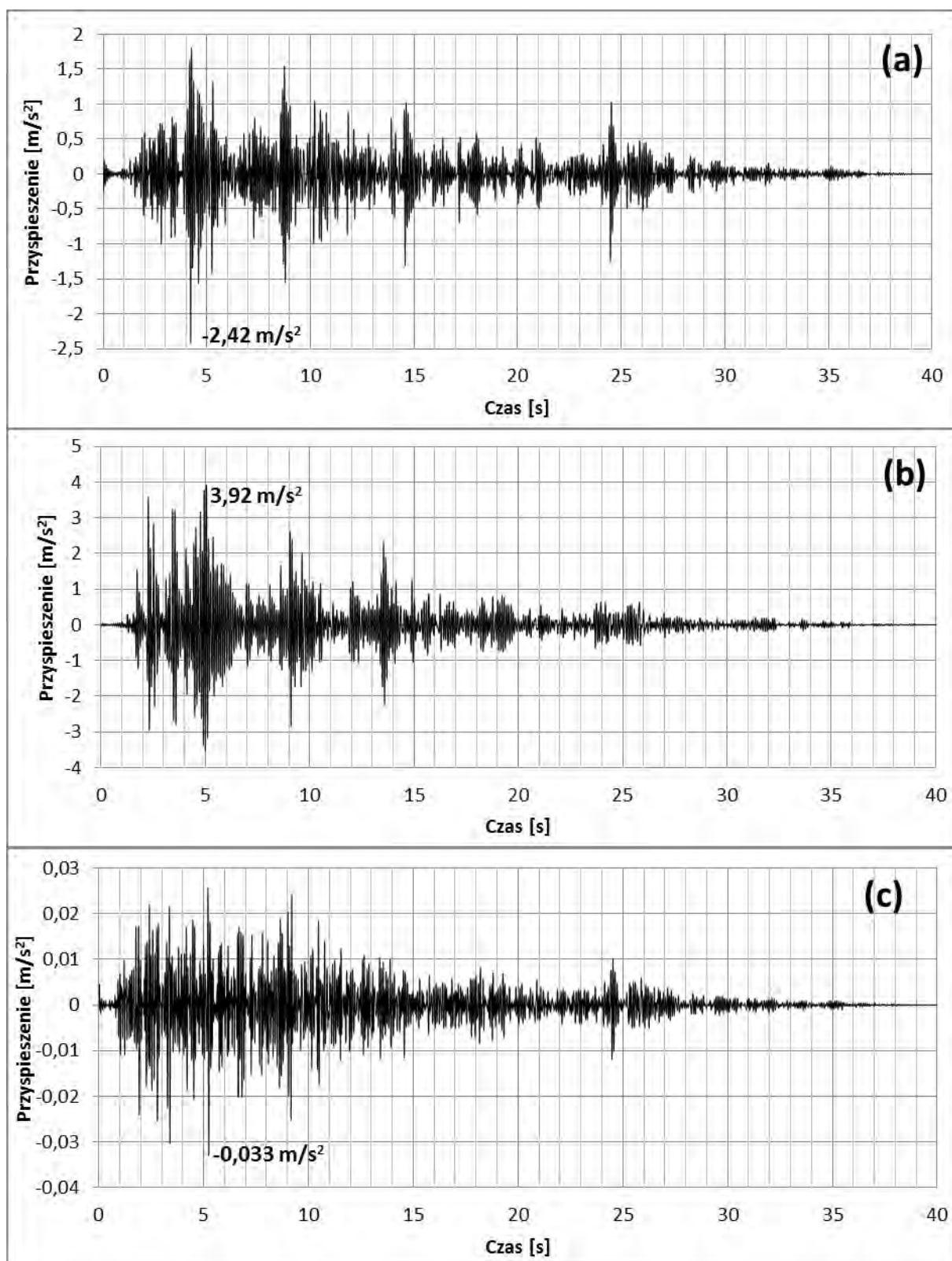
Rys. 4.42. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



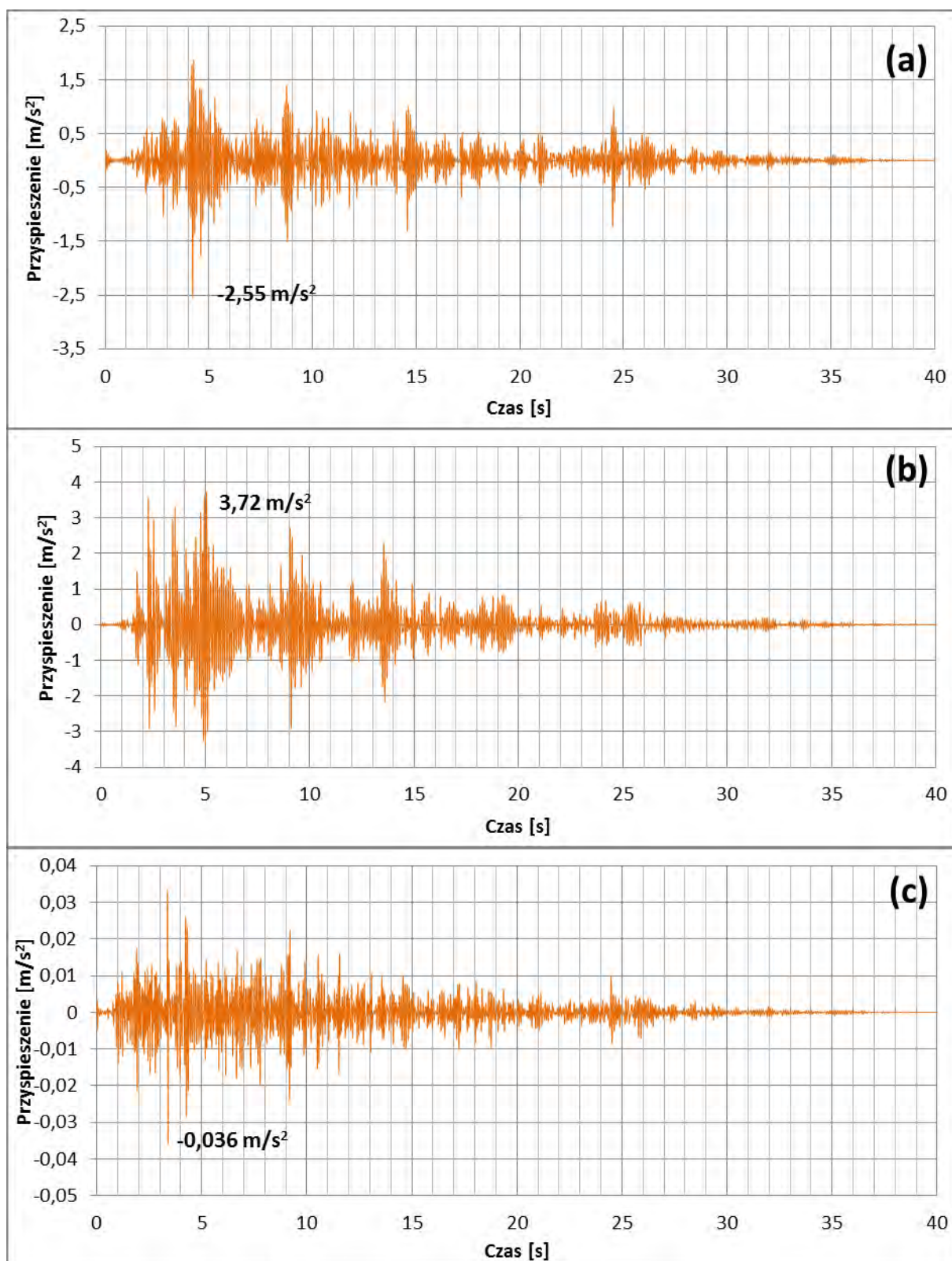
Rys. 4.43. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



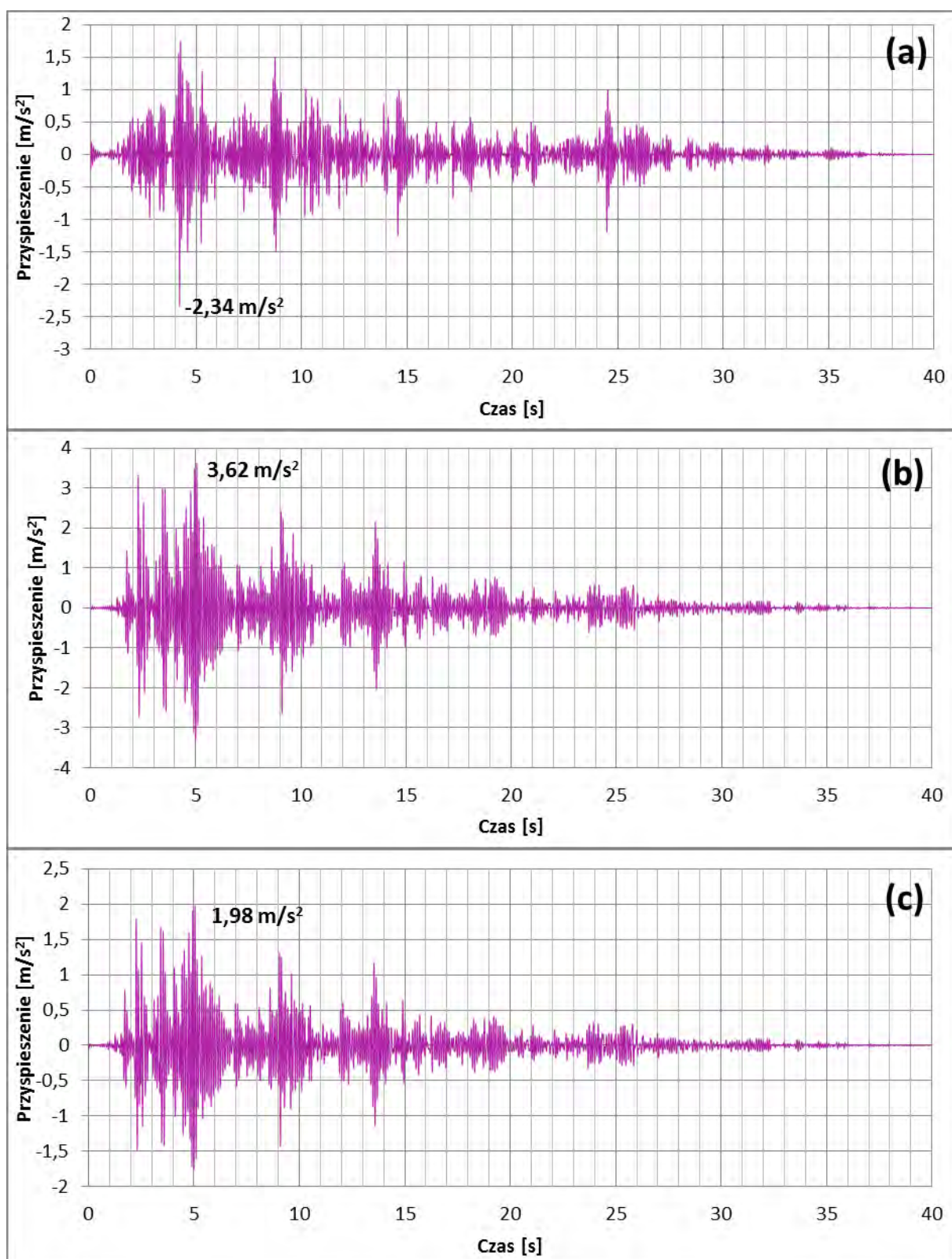
Rys. 4.44. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.45. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

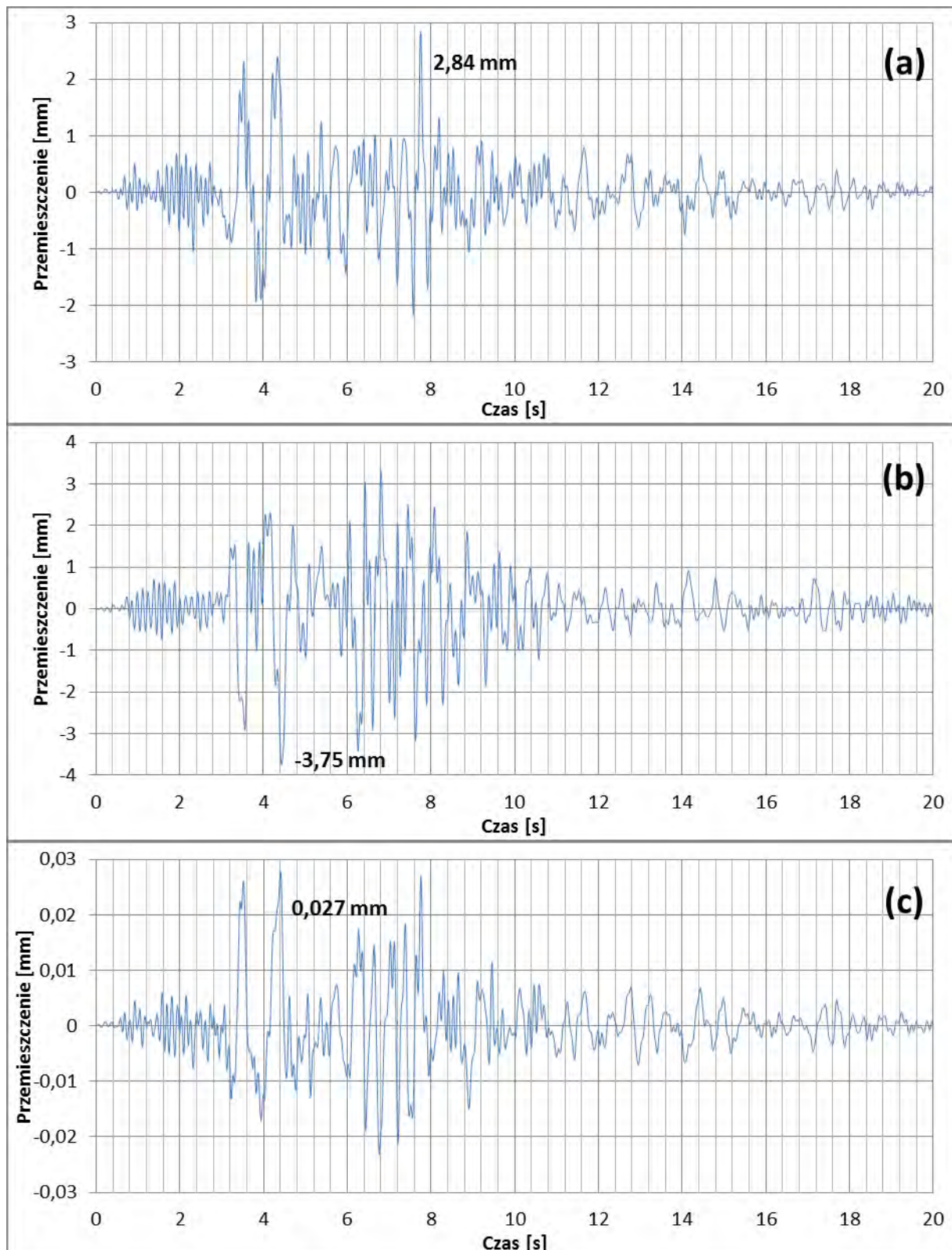


Rys. 4.46. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

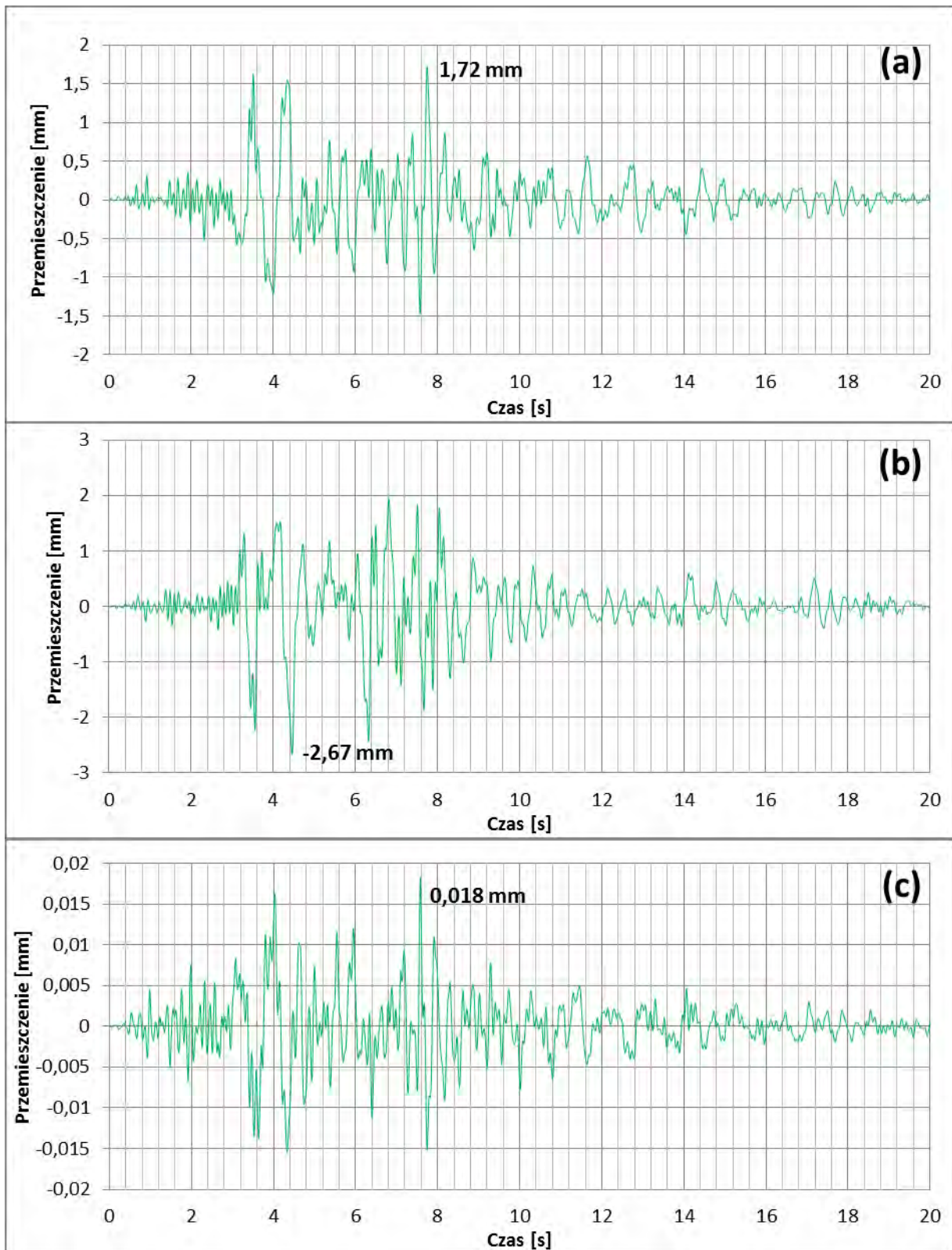


Rys. 4.47. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi El Centro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

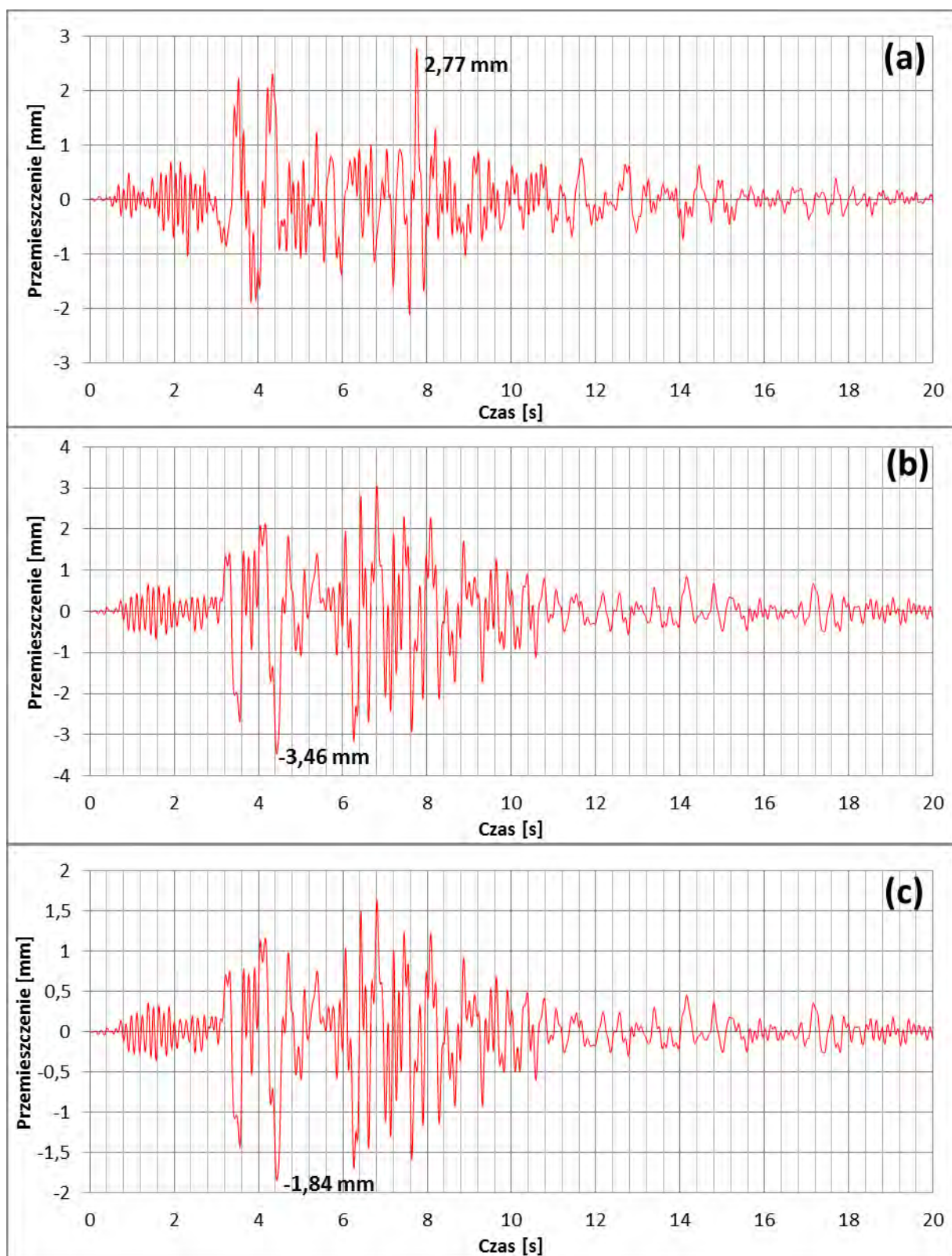
4.3.4.2 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kobe



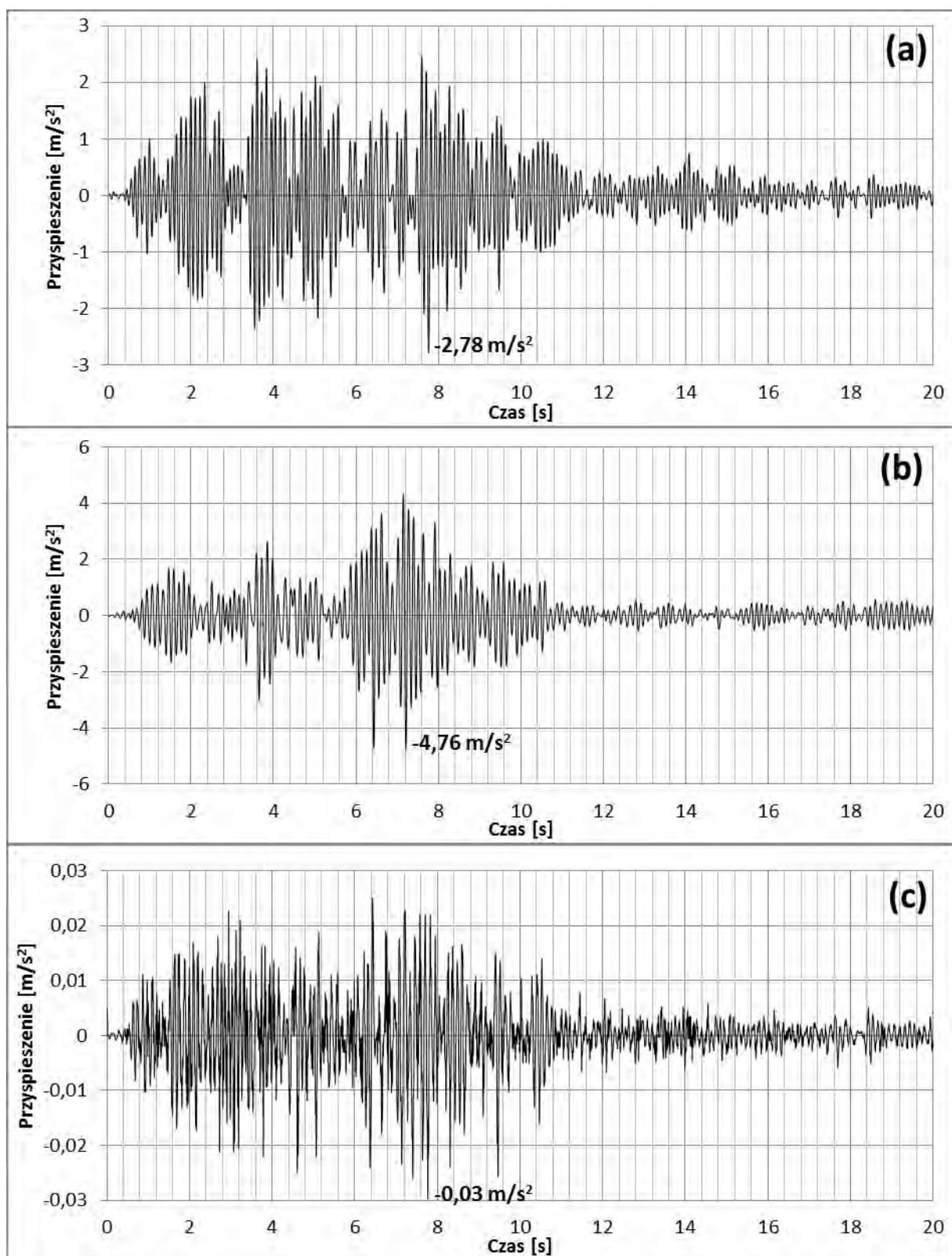
Rys. 4.48. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



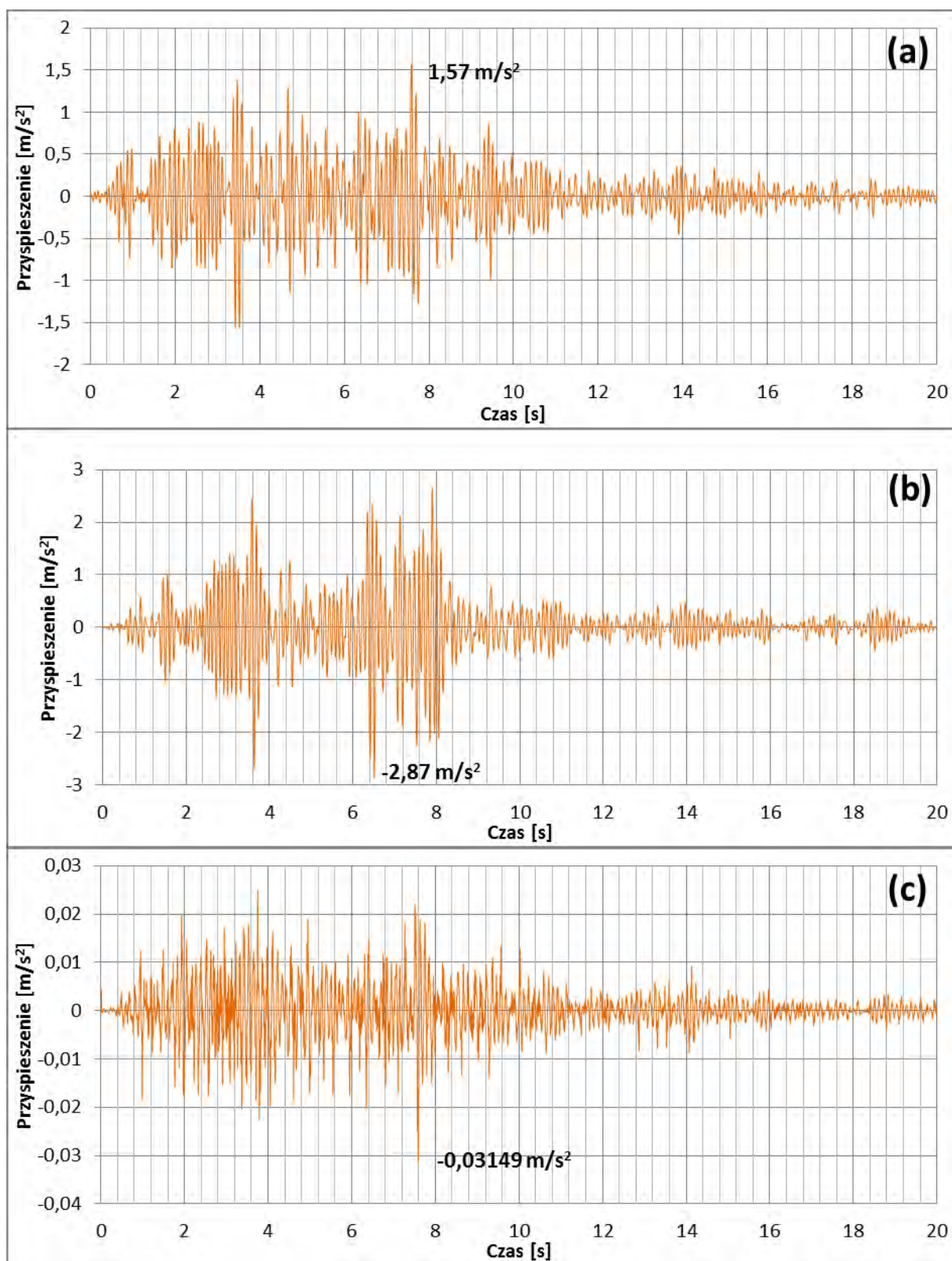
Rys. 4.49. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



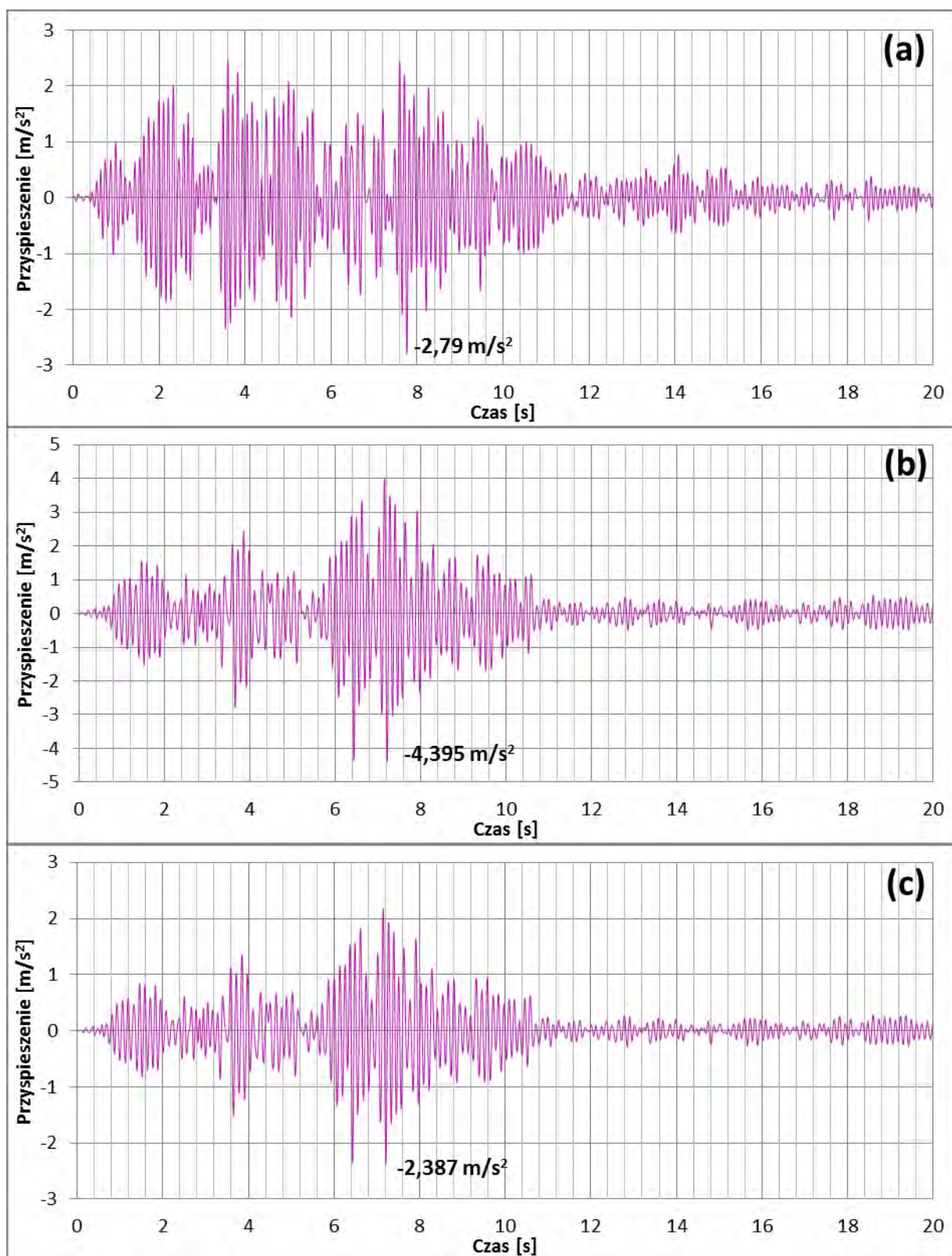
Rys. 4.50. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.51. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

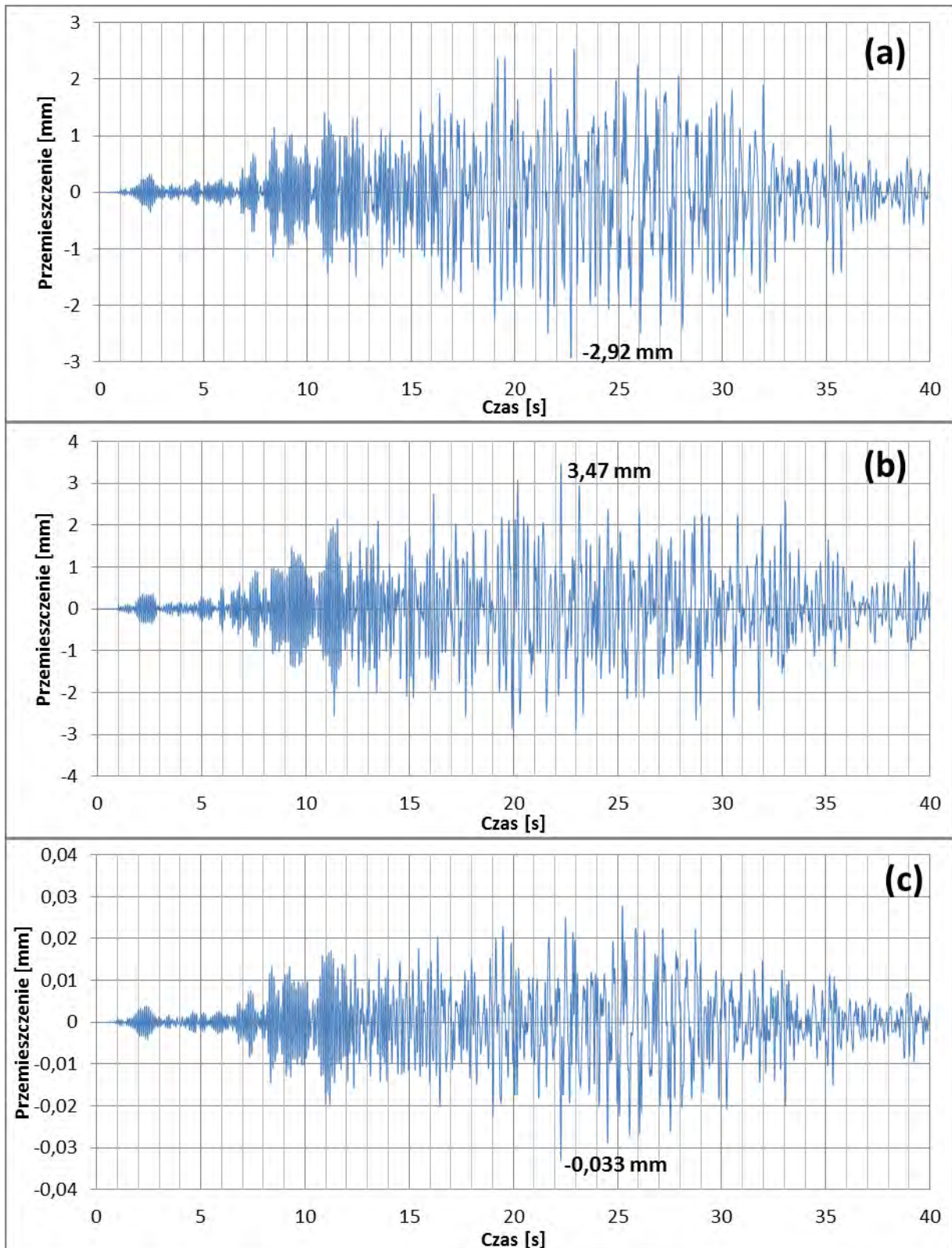


Rys. 4.52. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

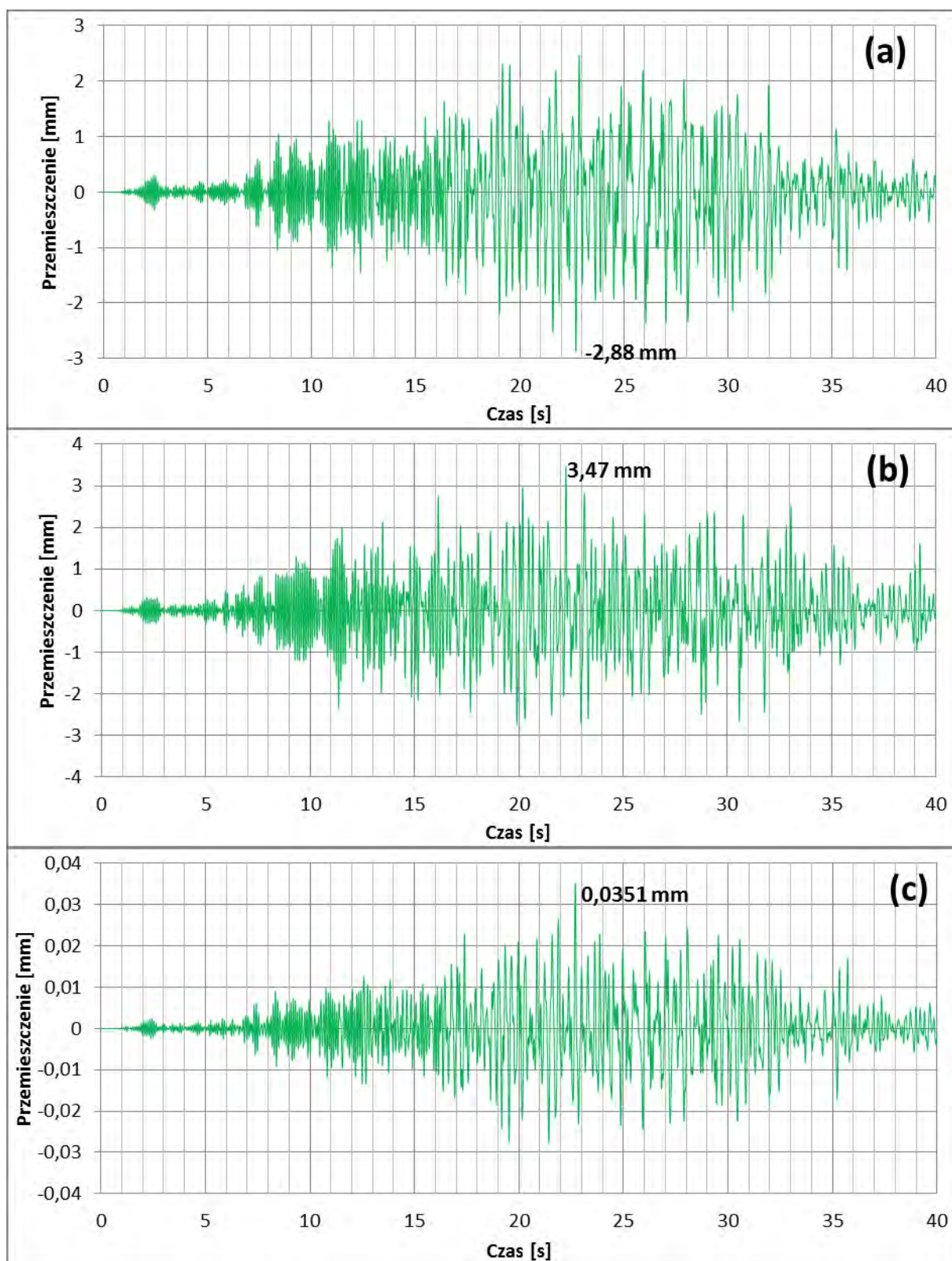


Rys. 4.53. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kobe: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

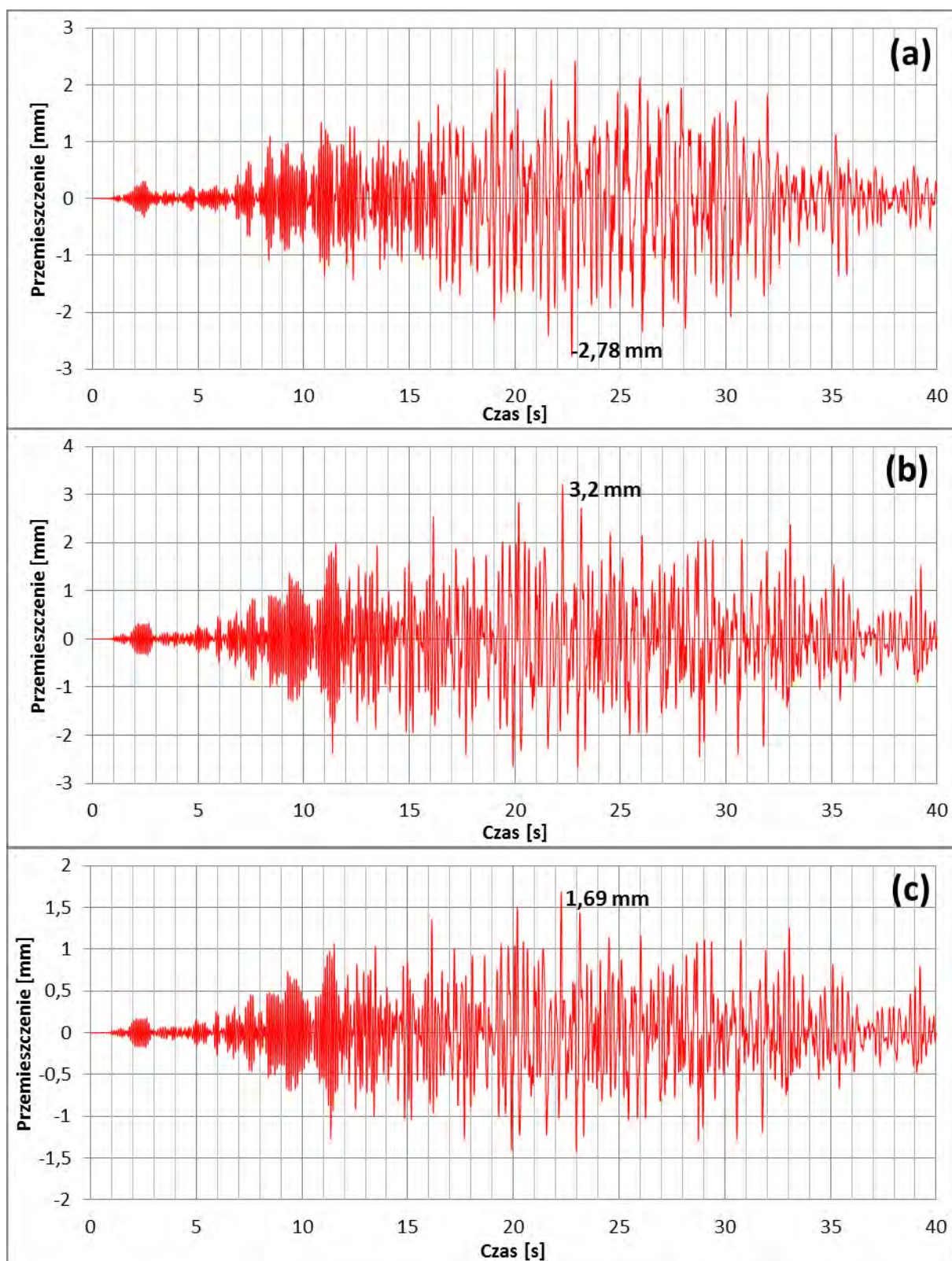
4.3.4.3 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi Kushiro



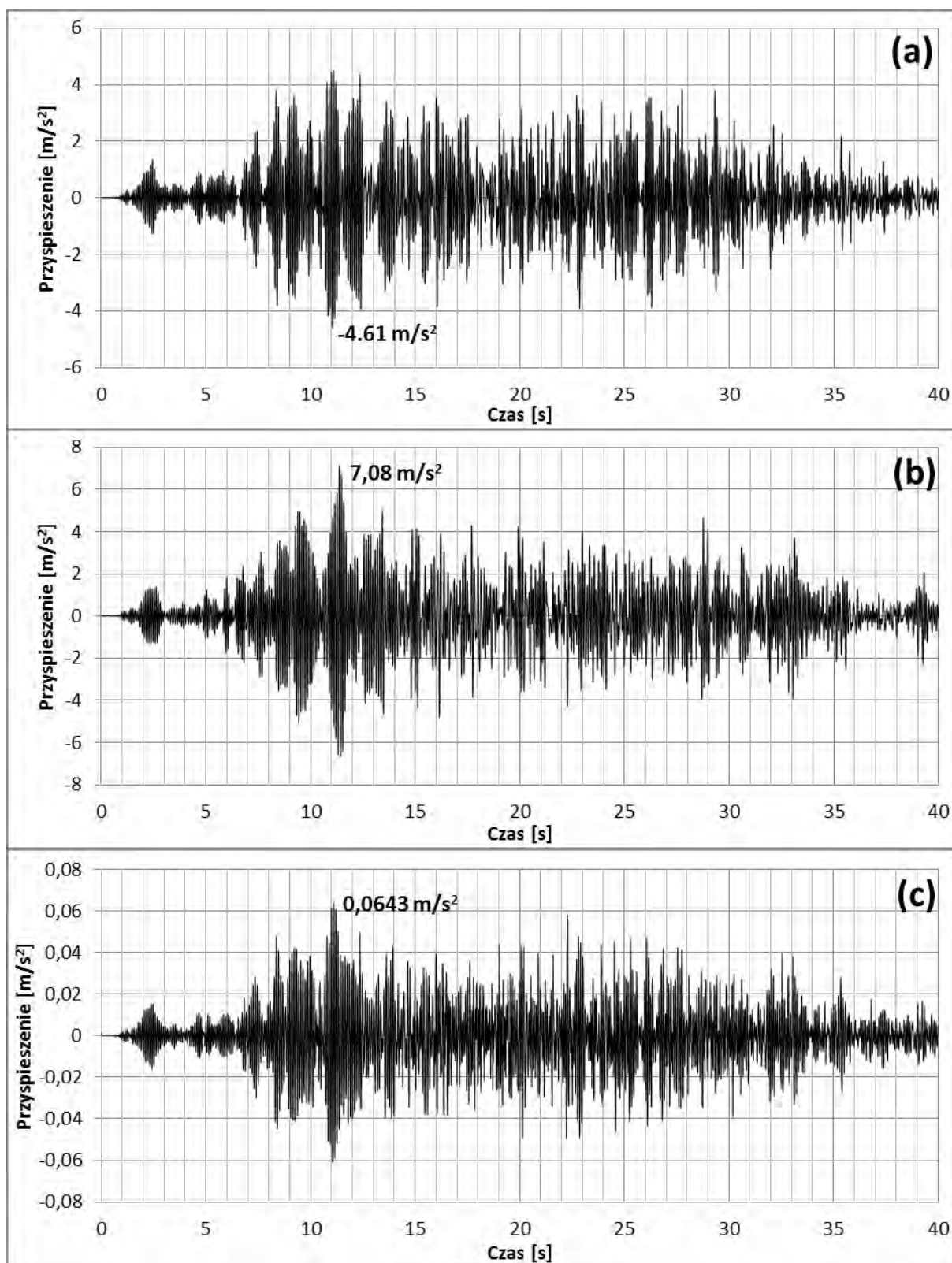
Rys. 4.54. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



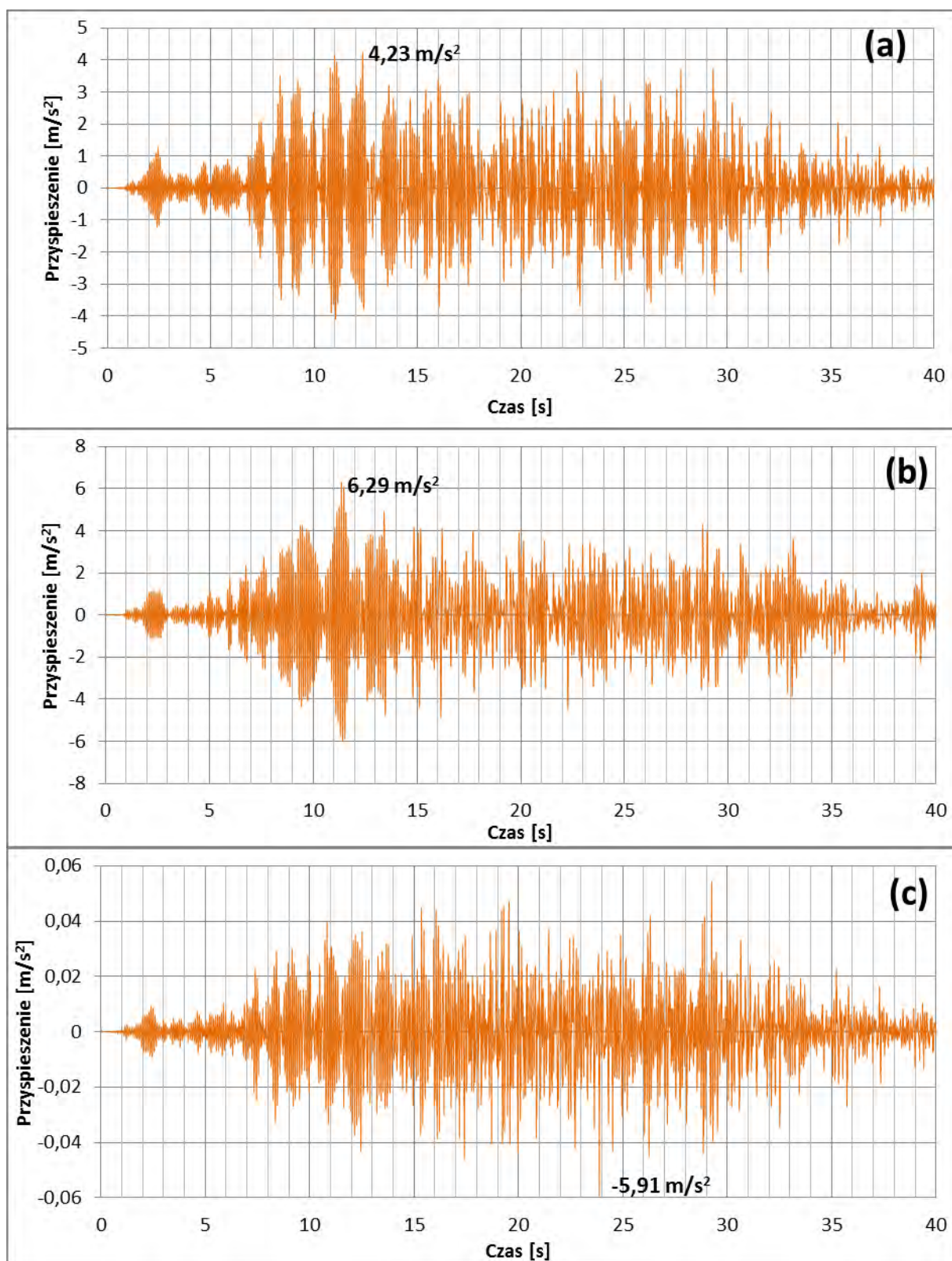
Rys. 4.55. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



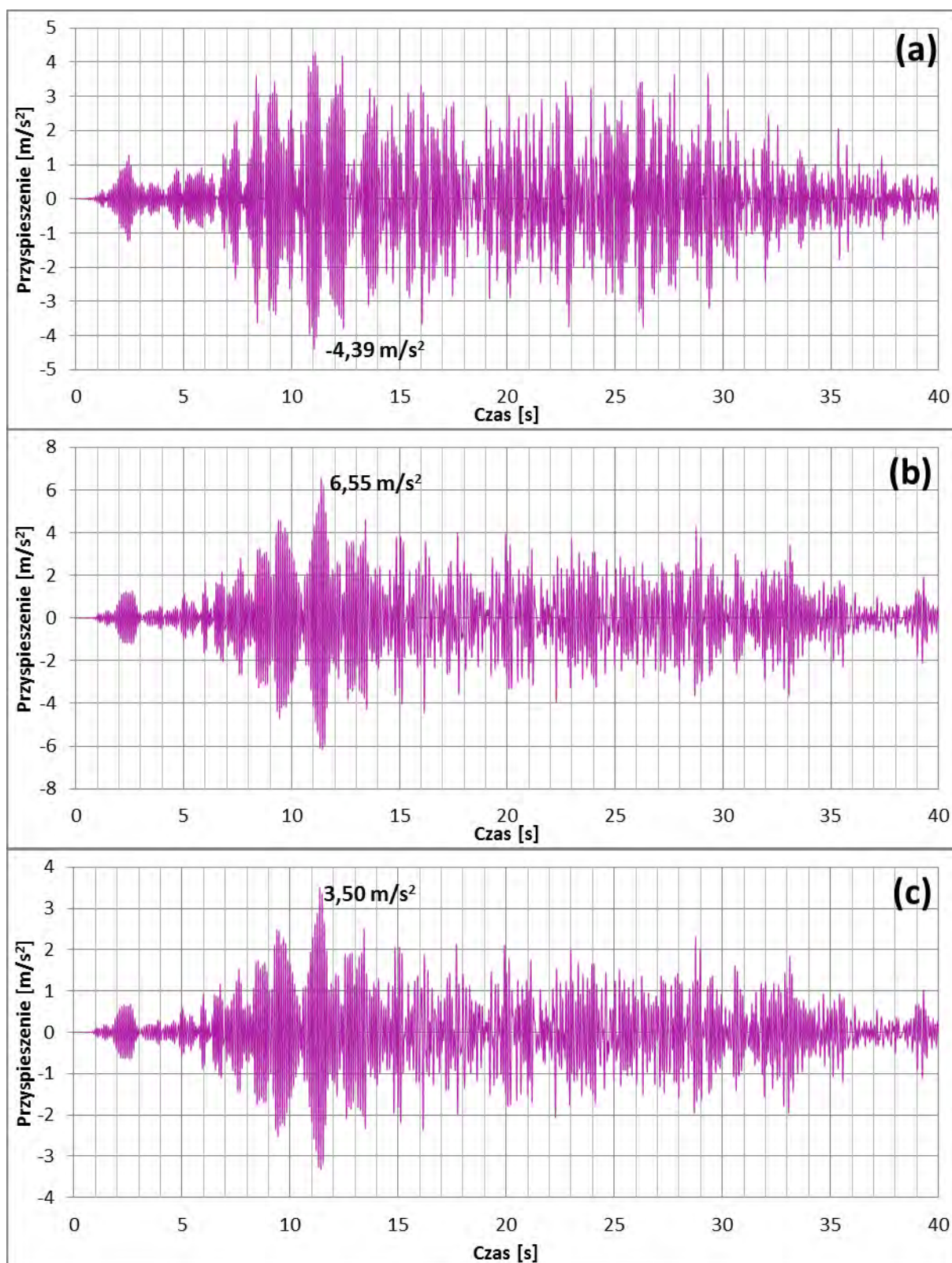
Rys. 4.56. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.57. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

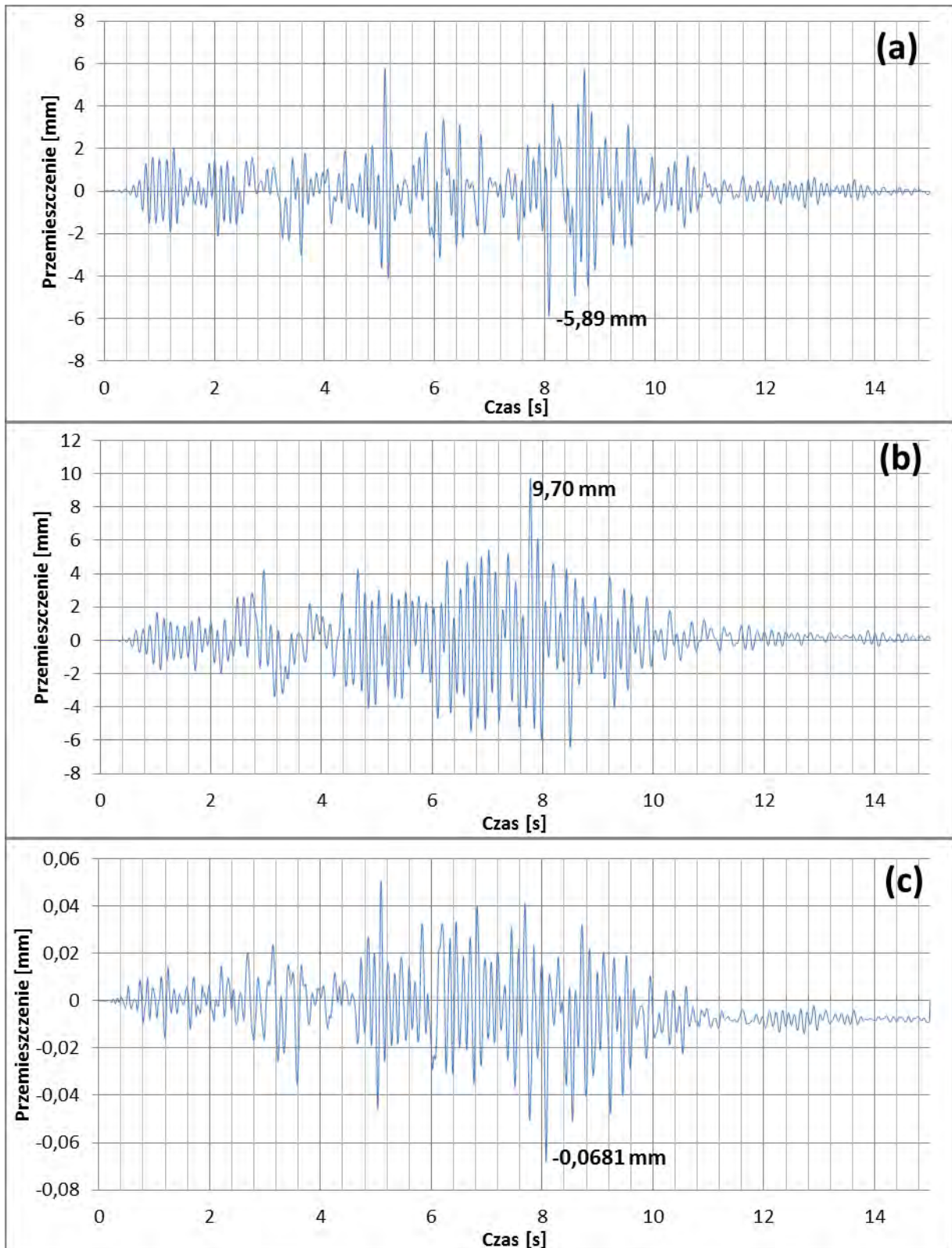


Rys. 4.58. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

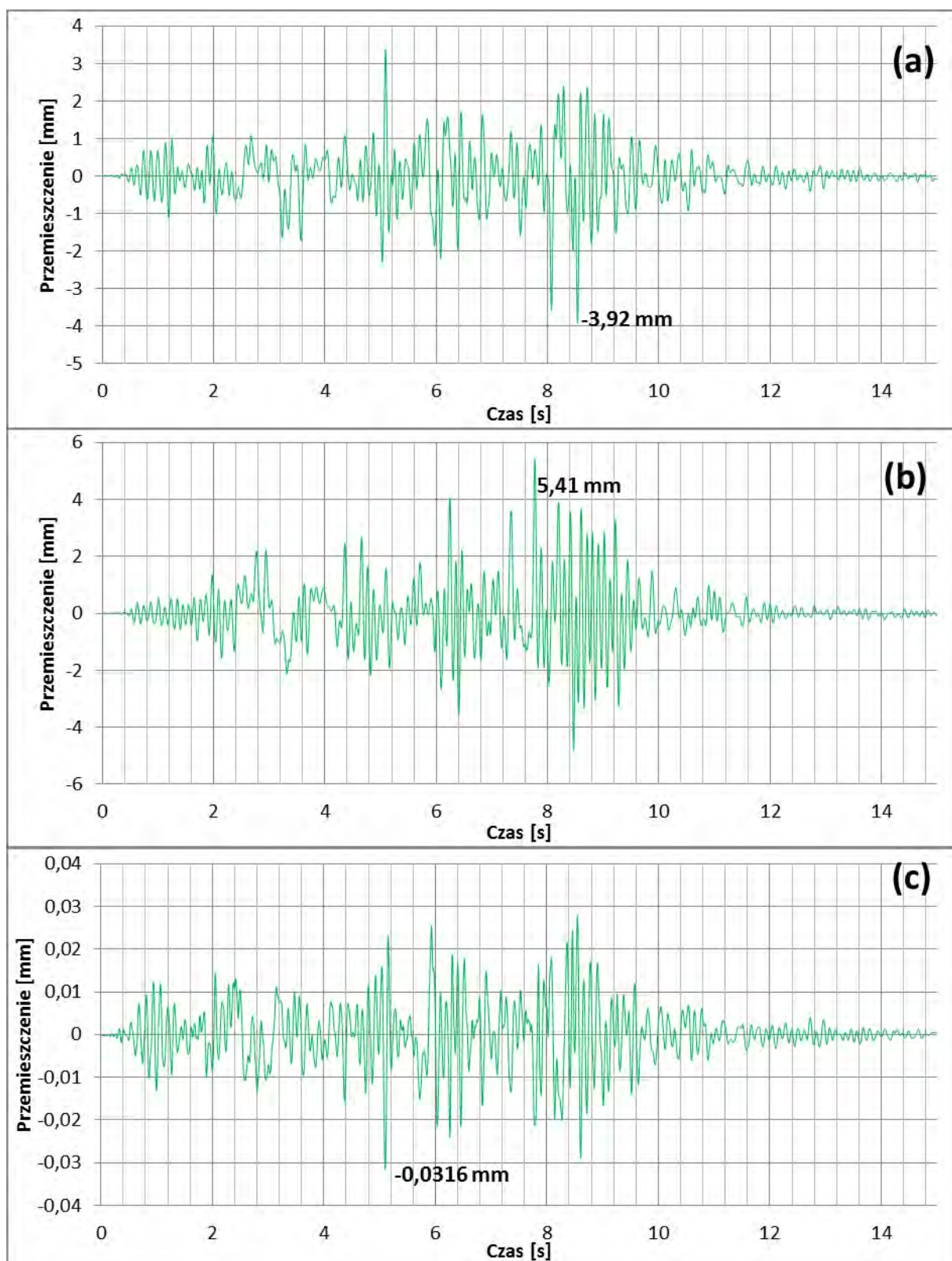


Rys. 4.59. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi Kushiro: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

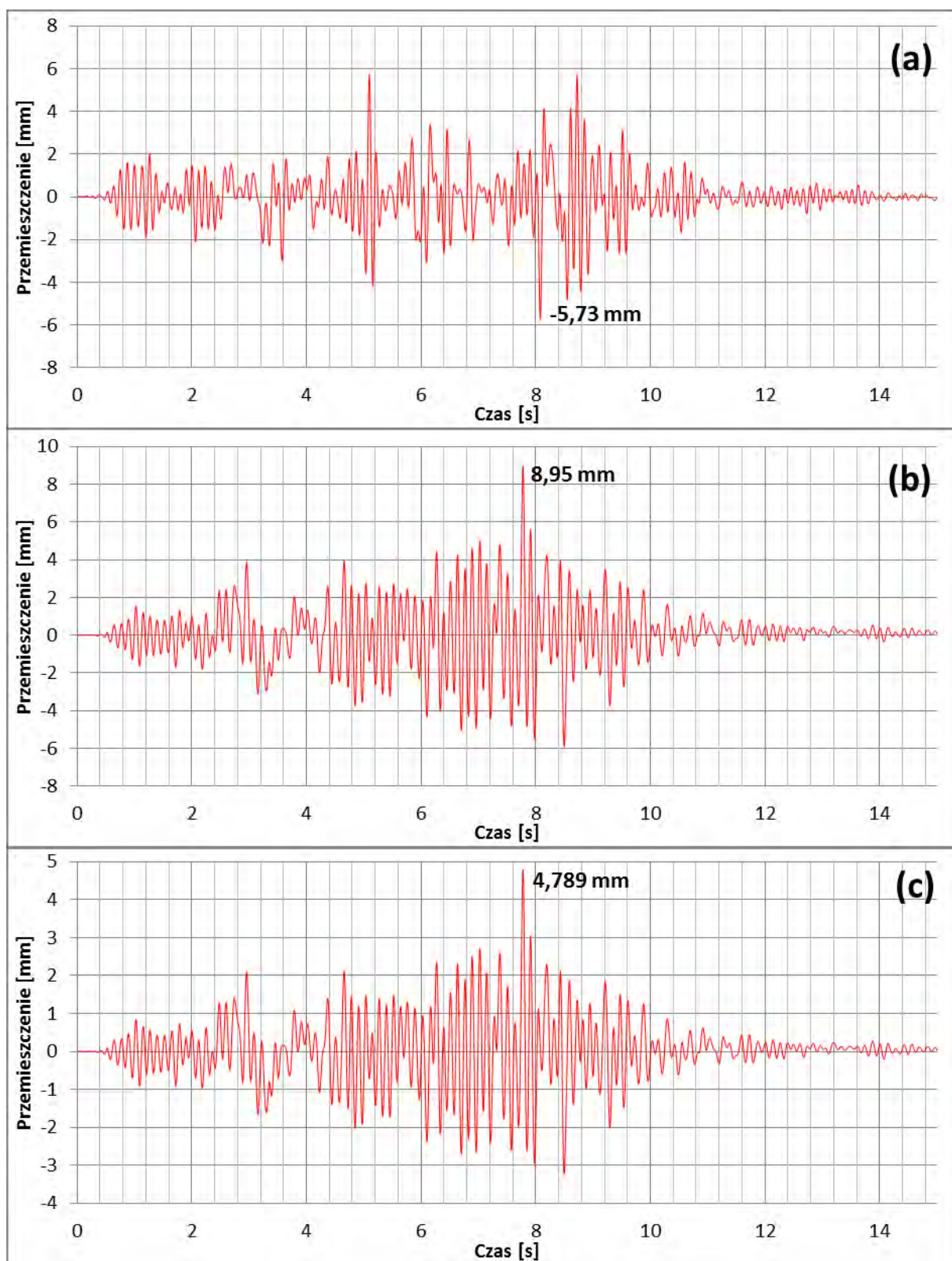
4.3.4.4 Przebiegi czasowe odpowiedzi dla trzęsienia ziemi San Fernando



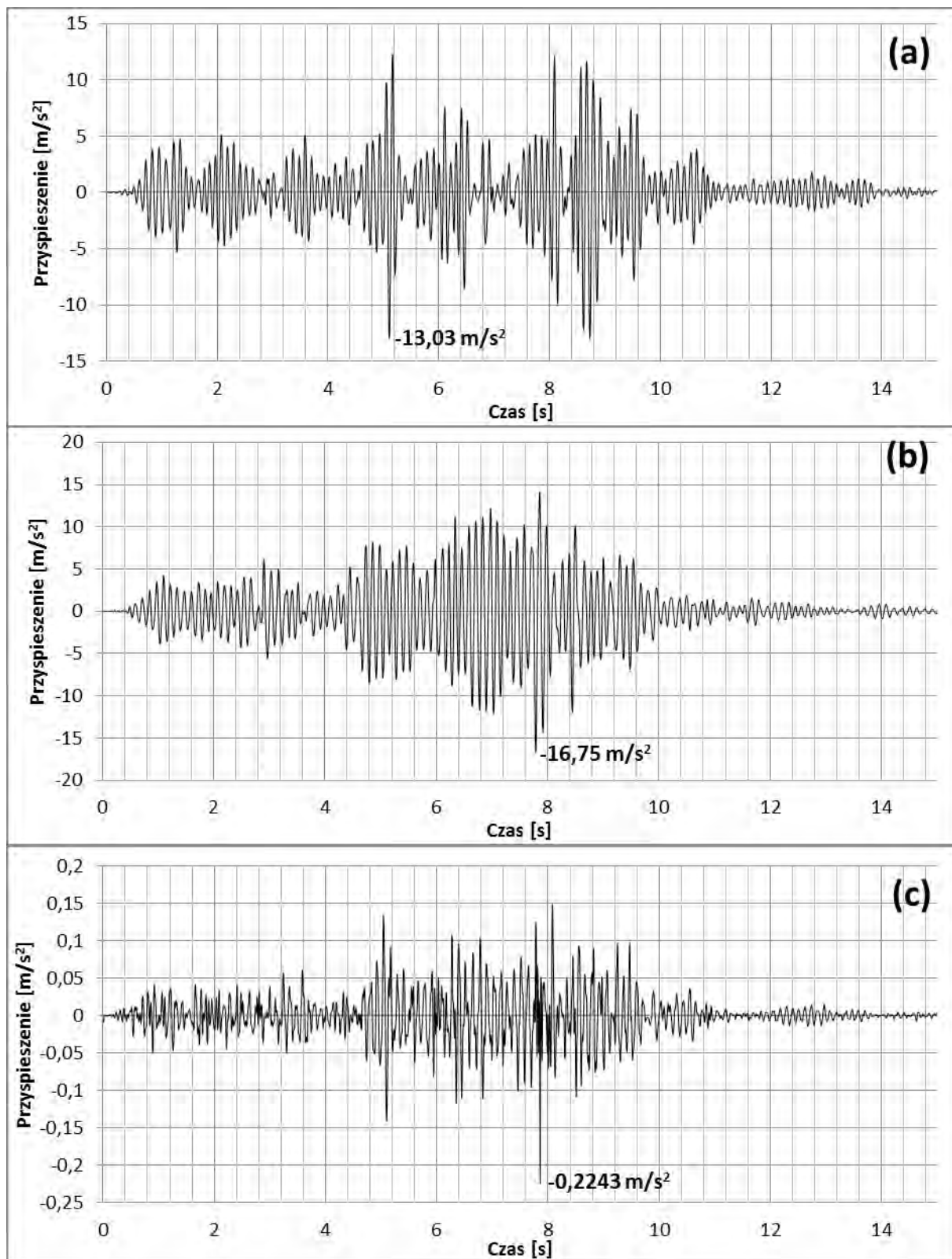
Rys. 4.60. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



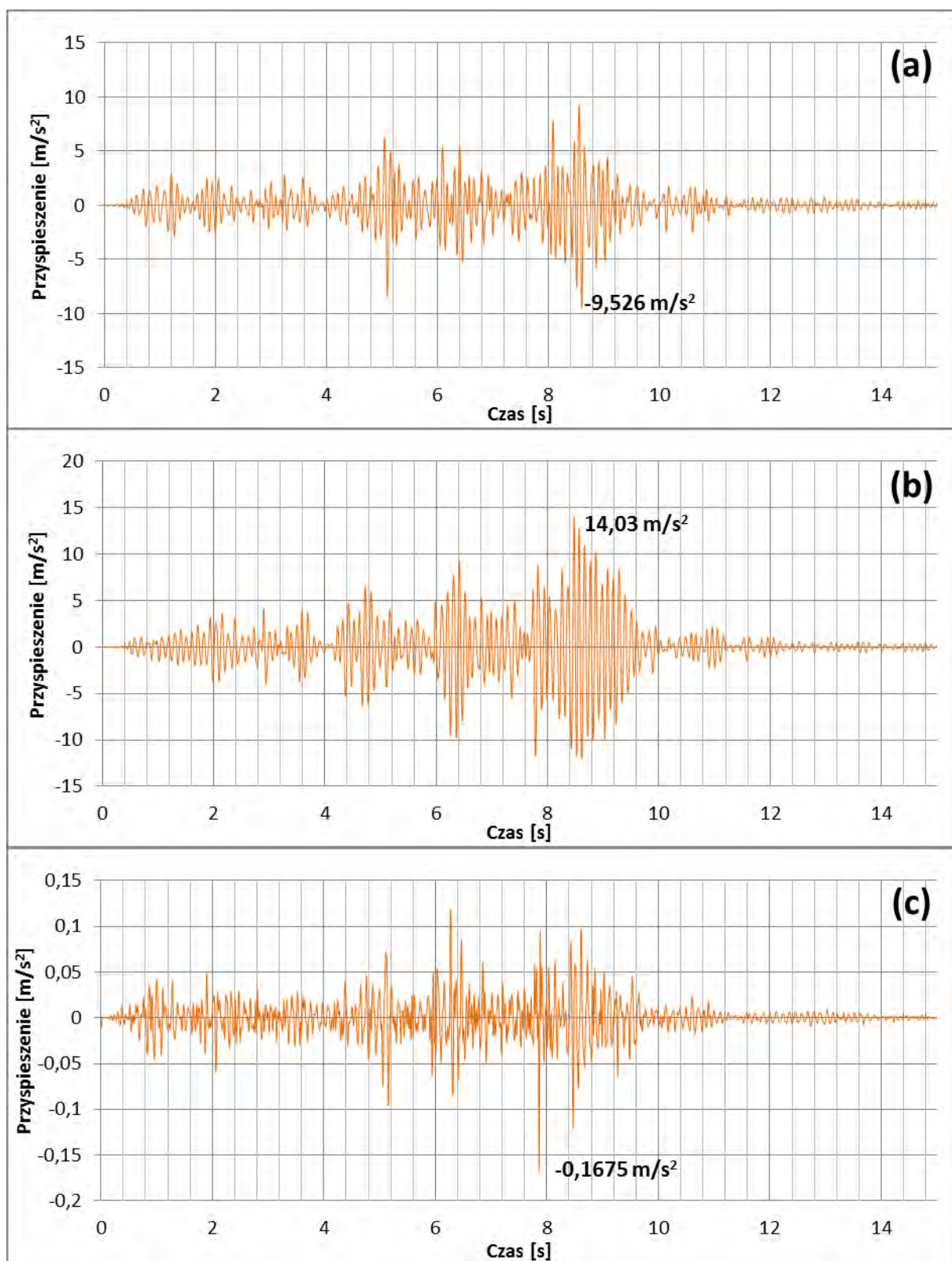
Rys. 4.61. Przebieg czasowy przemieszczenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



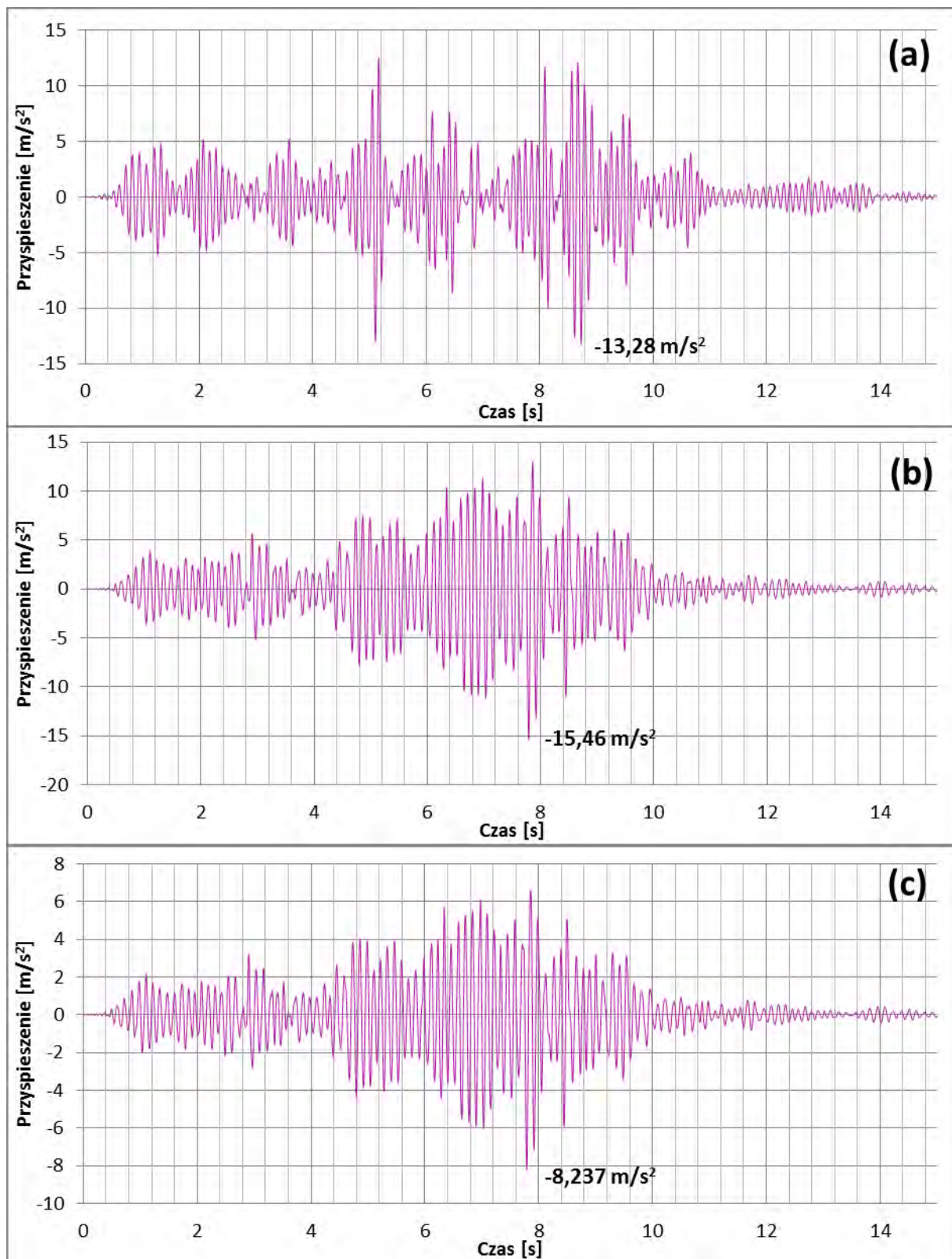
Rys. 4.62. Przebieg czasowy przemieszczenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.



Rys. 4.63. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny I (węzeł nr 53710) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

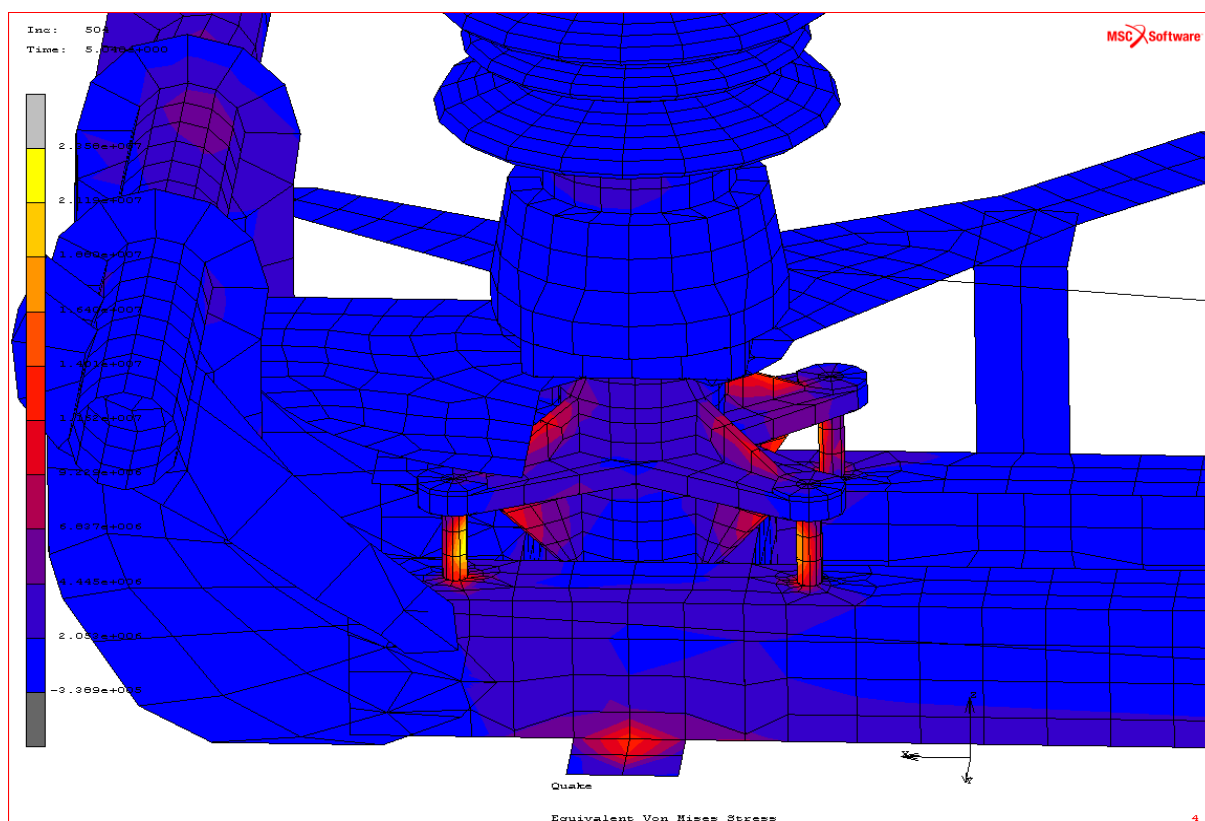
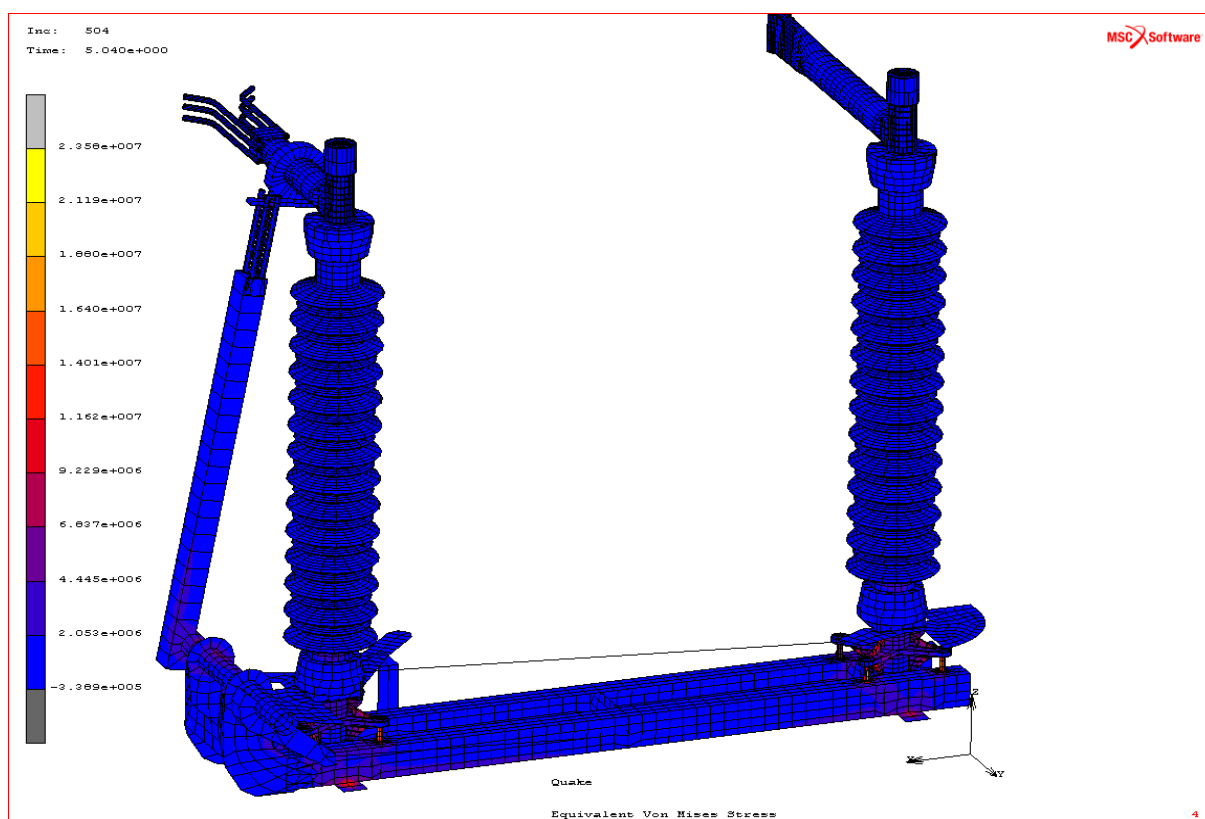


Rys. 4.64. Przebieg czasowy przyspieszenia szczytu kolumny II (węzeł nr 62229) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

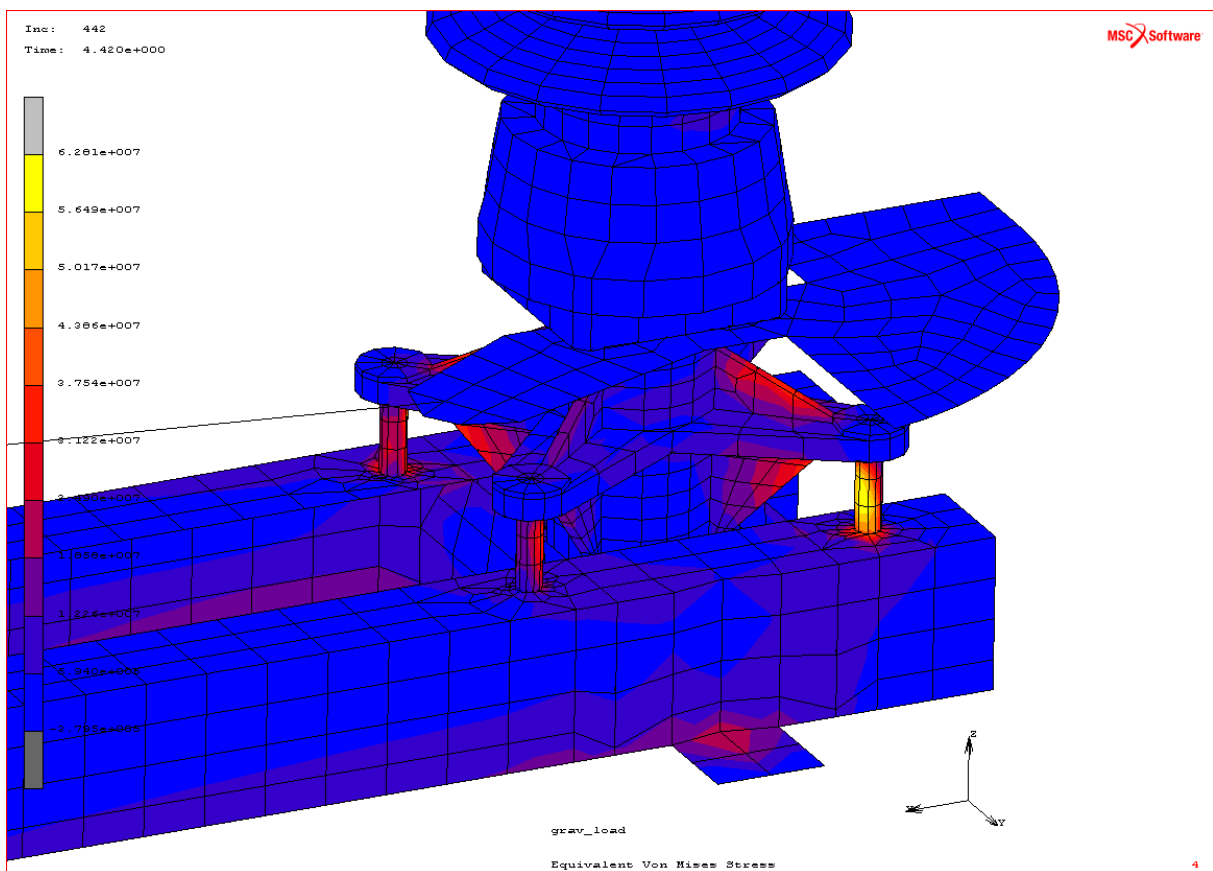
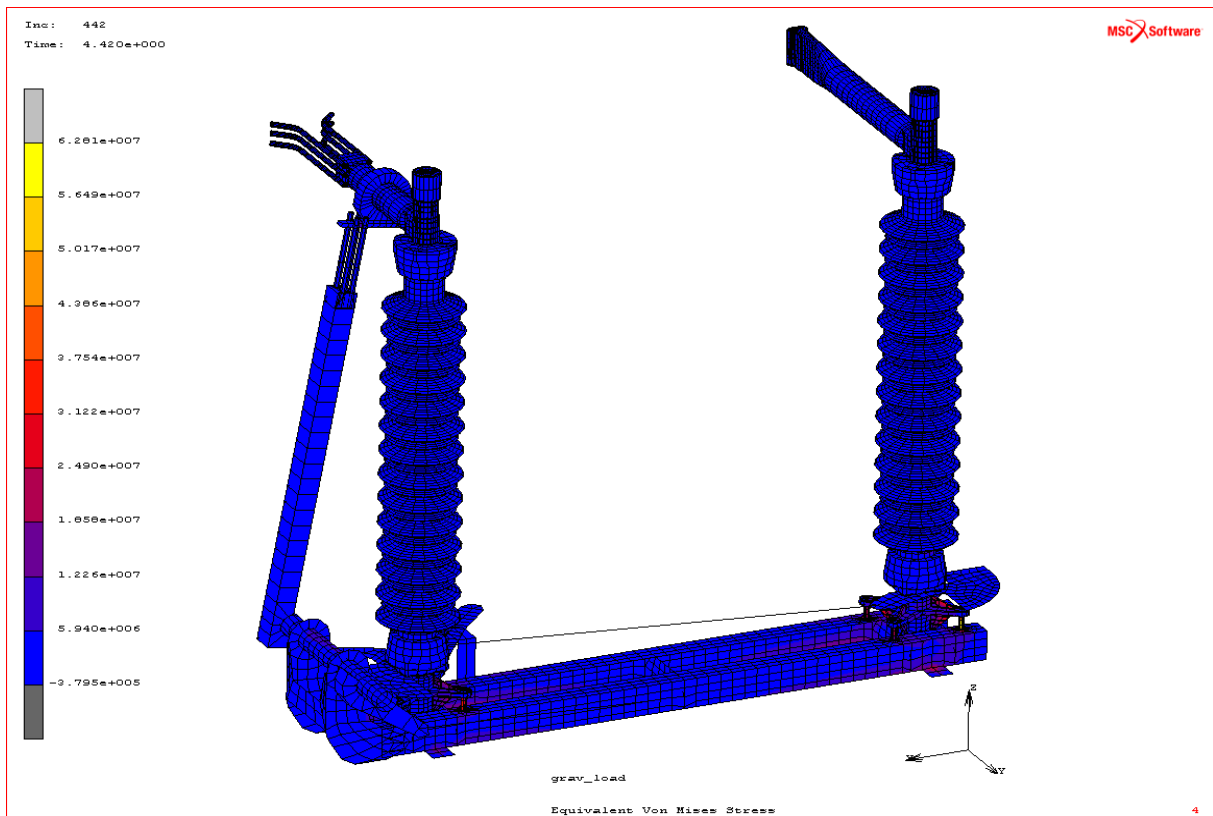


Rys. 4.65. Przebieg czasowy przyspieszenia środka toru prądowego (węzeł nr 65464) odłącznika otwartego dla trzęsienia ziemi San Fernando: (a) kierunek wzdłużny X; (b) kierunek poprzeczny Y; (c) kierunek pionowy Z.

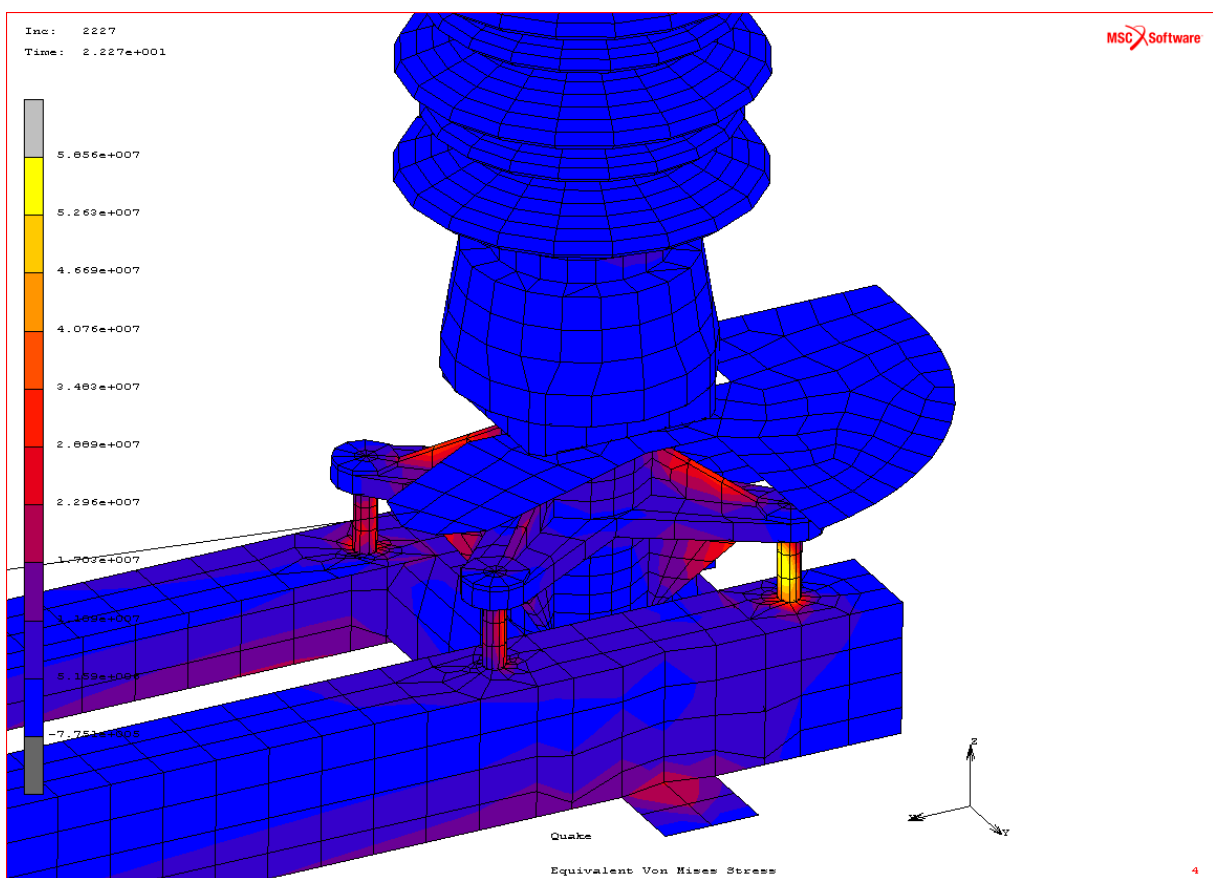
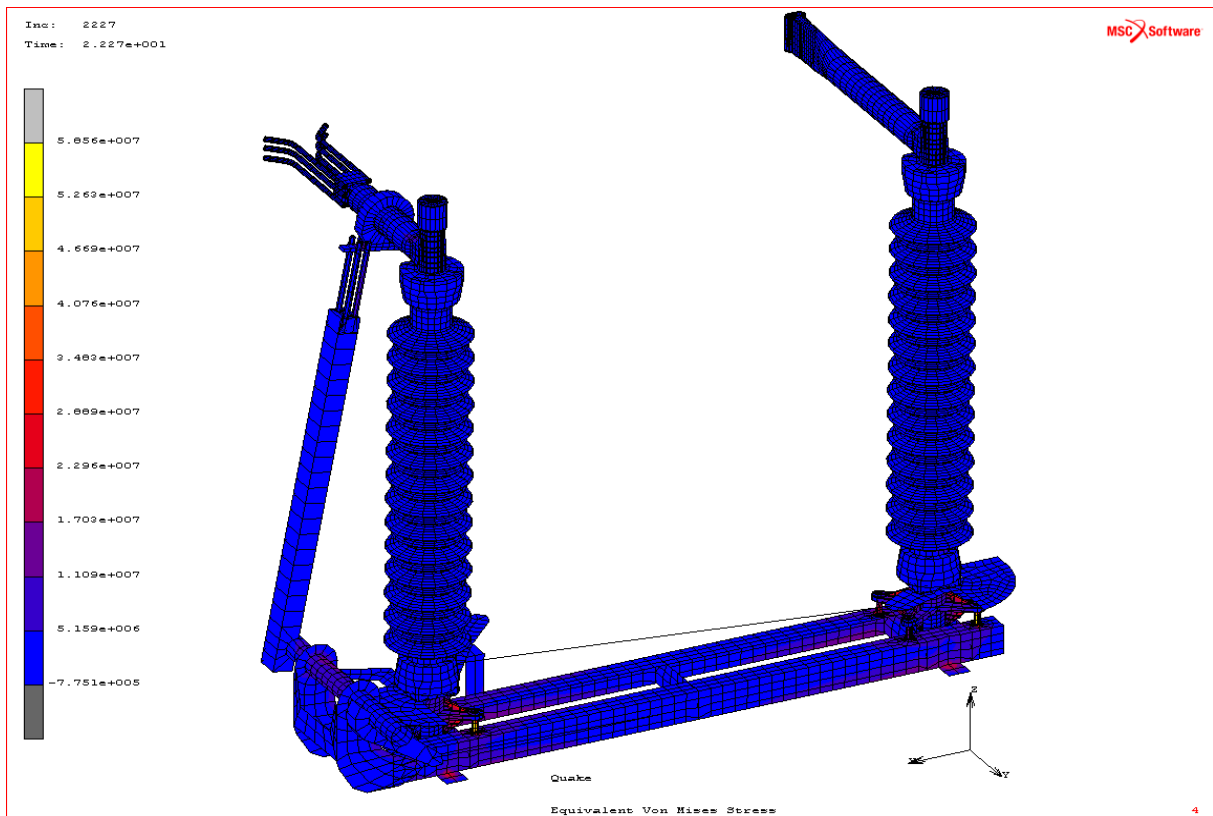
4.3.4.5 Mapy maksymalnych naprężeń oraz odkształceń plastycznych



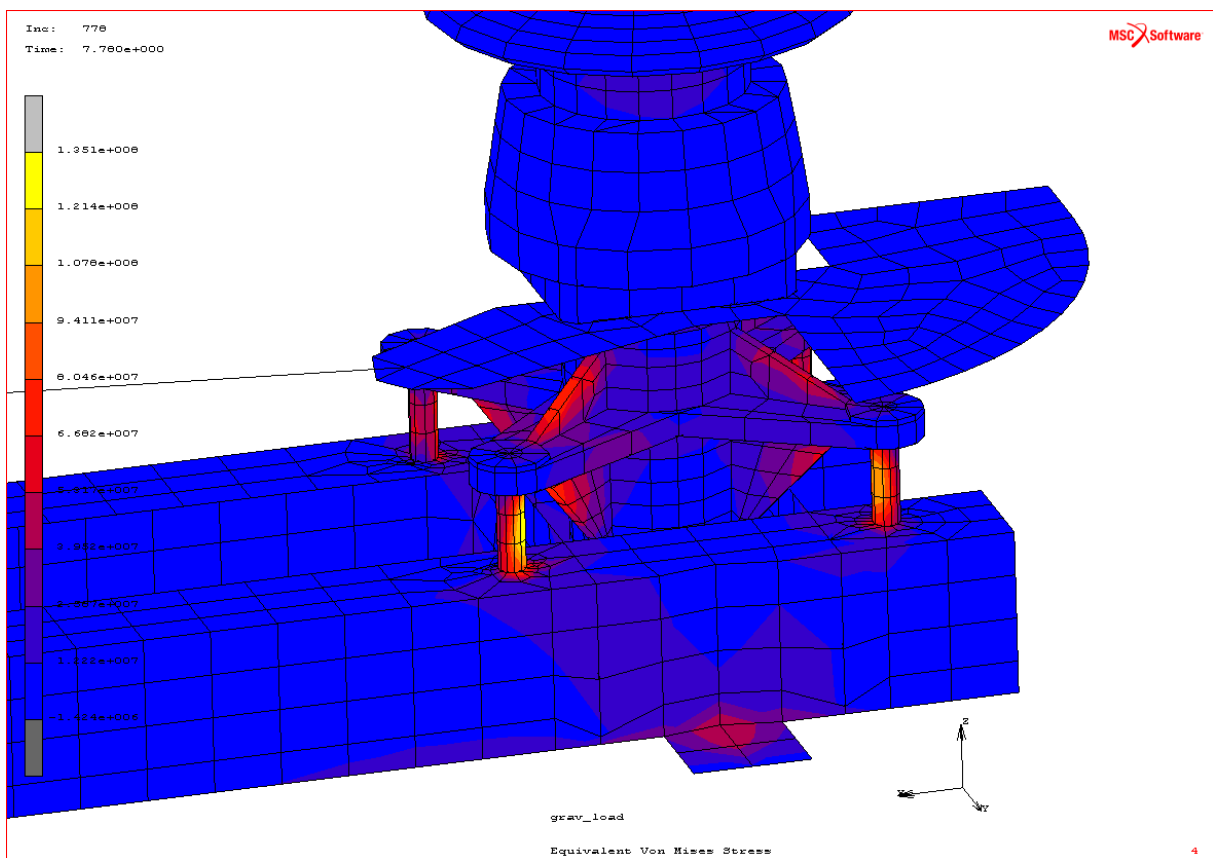
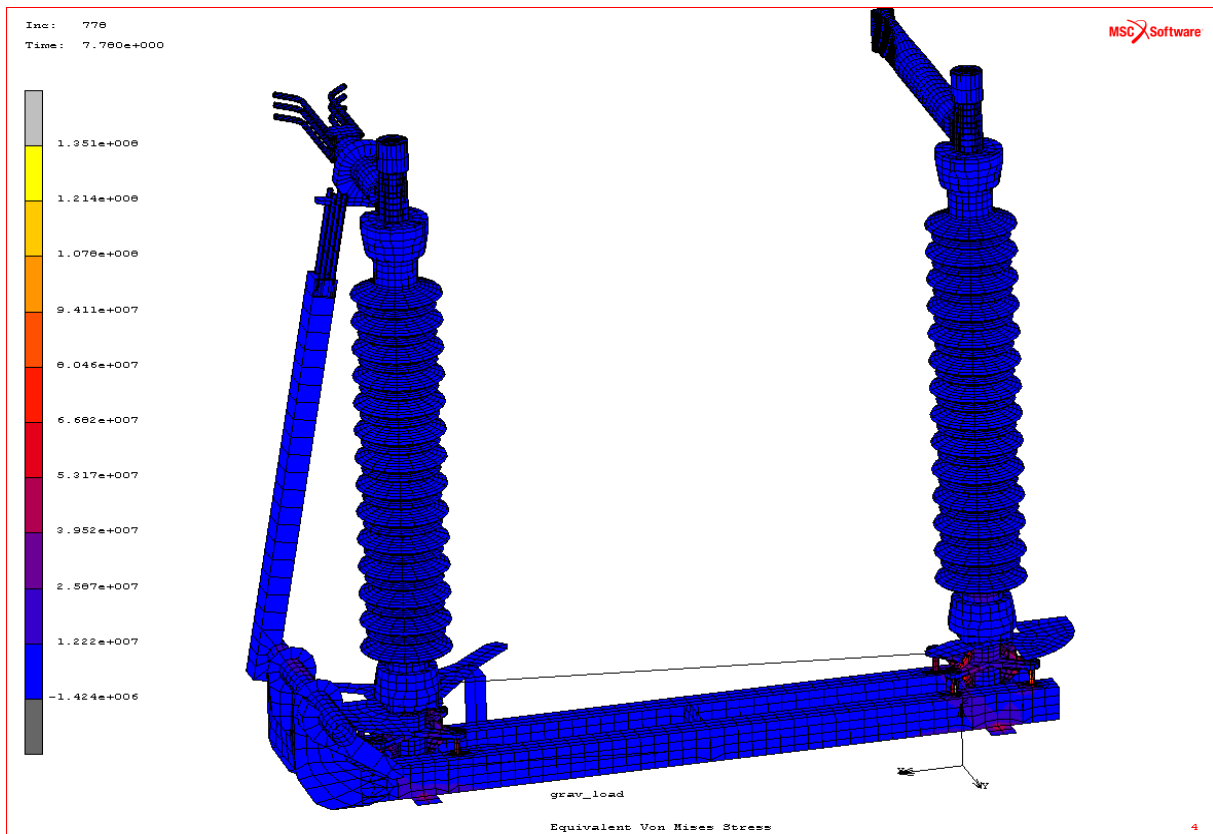
Rys. 4.66. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi El Centro dla odłącznika otwartego.



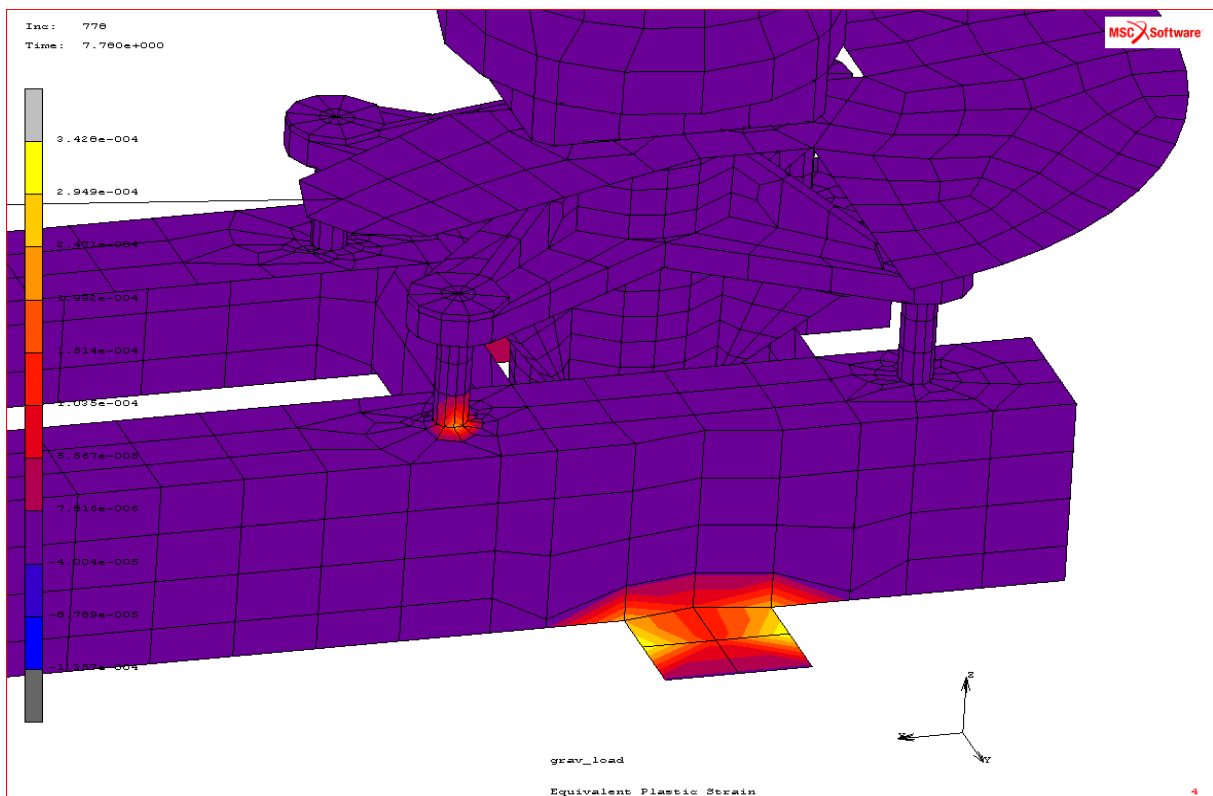
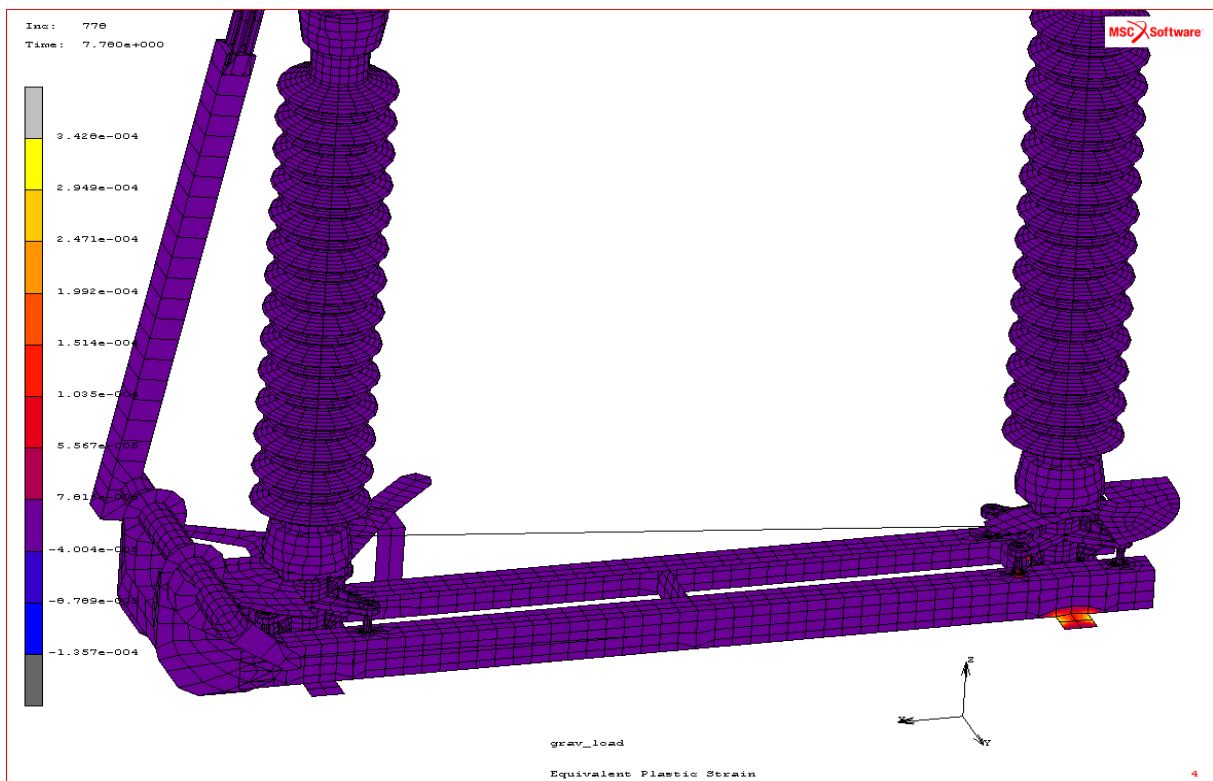
Rys. 4.67. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi Kobe dla odłącznika otwartego.



Rys. 4.68. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi Kushiro dla odłącznika otwartego.



Rys. 4.69. Mapa maksymalnych naprężeń dla trzęsienia ziemi San Fernando dla odłącznika otwartego.



Rys. 4.70. Mapa maksymalnych odkształceń plastycznych dla trzęsienia ziemi San Fernando dla odłącznika otwartego.

Wyniki nieliniowych analiz numerycznych otrzymane dla odłącznika otwartego (zob. Rys. 4.42-4.65) wykazują istotne różnice w przebiegach czasowych w stosunku do odpowiedzi otrzymanych dla odłącznika w konfiguracji zamkniętej. Z pośród czterech analizowanych przebiegów czasowych wstrząsów sejsmicznych najwyższe poziomy odpowiedzi wystąpiły również dla trzęsienia ziemi San Fernando. Warto zauważyć jednak, iż podparcie toru prądowego (zob. Rys. 4.3) spowodowało ograniczenie odpowiedzi kolumny II w kierunku poprzecznym Y oraz wzdłużnym X. Dlatego też, w przypadku odłącznika otwartego, największe amplitudy drgań w kierunku poprzecznym Y dla wszystkich analizowanych wstrząsów sejsmicznych otrzymano na szczycie kolumny I (węzeł nr 53710). Z kolei, dla kierunku wzdłużnego X jedynie w przypadku trzęsienia ziemi El Centro większe wzbudzenie do drgań wykazuje kolumna II. W przypadku pozostałych analizowanych trzęsień ziemi największe wartości ekstremalnych przemieszczeń i przyspieszeń zaobserwowano dla kolumny I (węzeł nr 53710). Wartości te są wyższe od analogicznych wartości rejestrowanych na szczycie kolumny II nawet o 79,3% (por. Rys. 4.60 i Rys. 4.61 dla trzęsienia ziemi San Fernando). Jednocześnie, największe wartości ekstremalne przemieszczeń oraz przyspieszeń w kierunku pionowym Z otrzymano dla węzła nr 65464 na końcu niepodpartej części stykowej toru prądowego (podobnie jak w przypadku odłącznika zamkniętego).

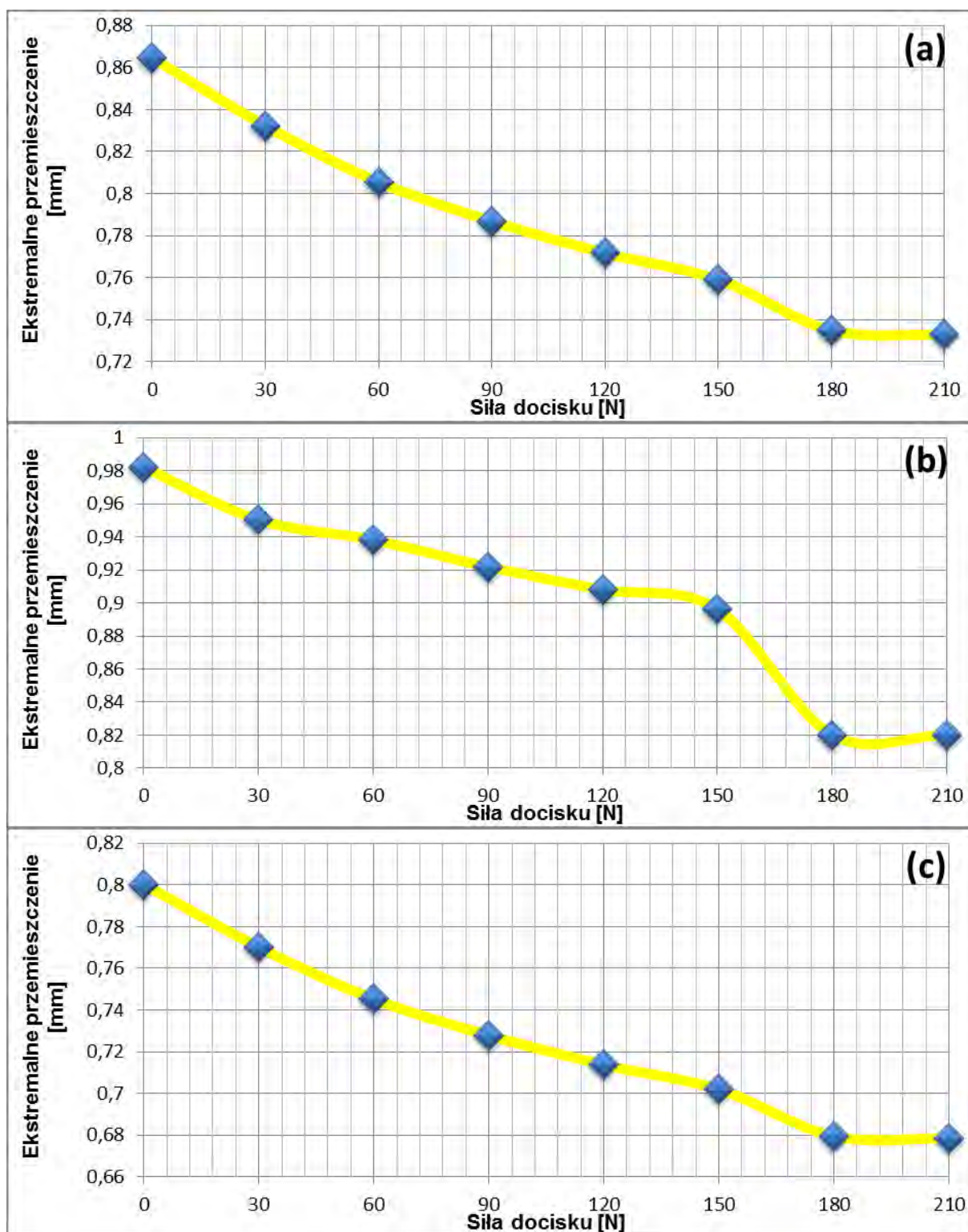
Również dla odłącznika w konfiguracji otwartej, największe wartości naprężeń, wywołane analizowanymi trzęsieniami ziemi, wystąpiły w ramie podstawy konstrukcji, w miejscach połączenia pomiędzy ramą podstawy a kolumnami (głównie w śrubach łączących) oraz w dolnych częściach kolumn (zob. Rys. 4.66-4.69). W żadnym punkcie nie doszło do kruchego pęknięcia części ceramicznych, ale dla odłącznika otwartego poddanego działaniu trzęsienia ziemi San Fernando zaobserwowano odkształcenia plastyczne w łapach ramy podstawy oraz w śrubach łączących ramę podstawy z kolumną I (zob. Rys. 4.70).

4.4 Analiza parametryczna

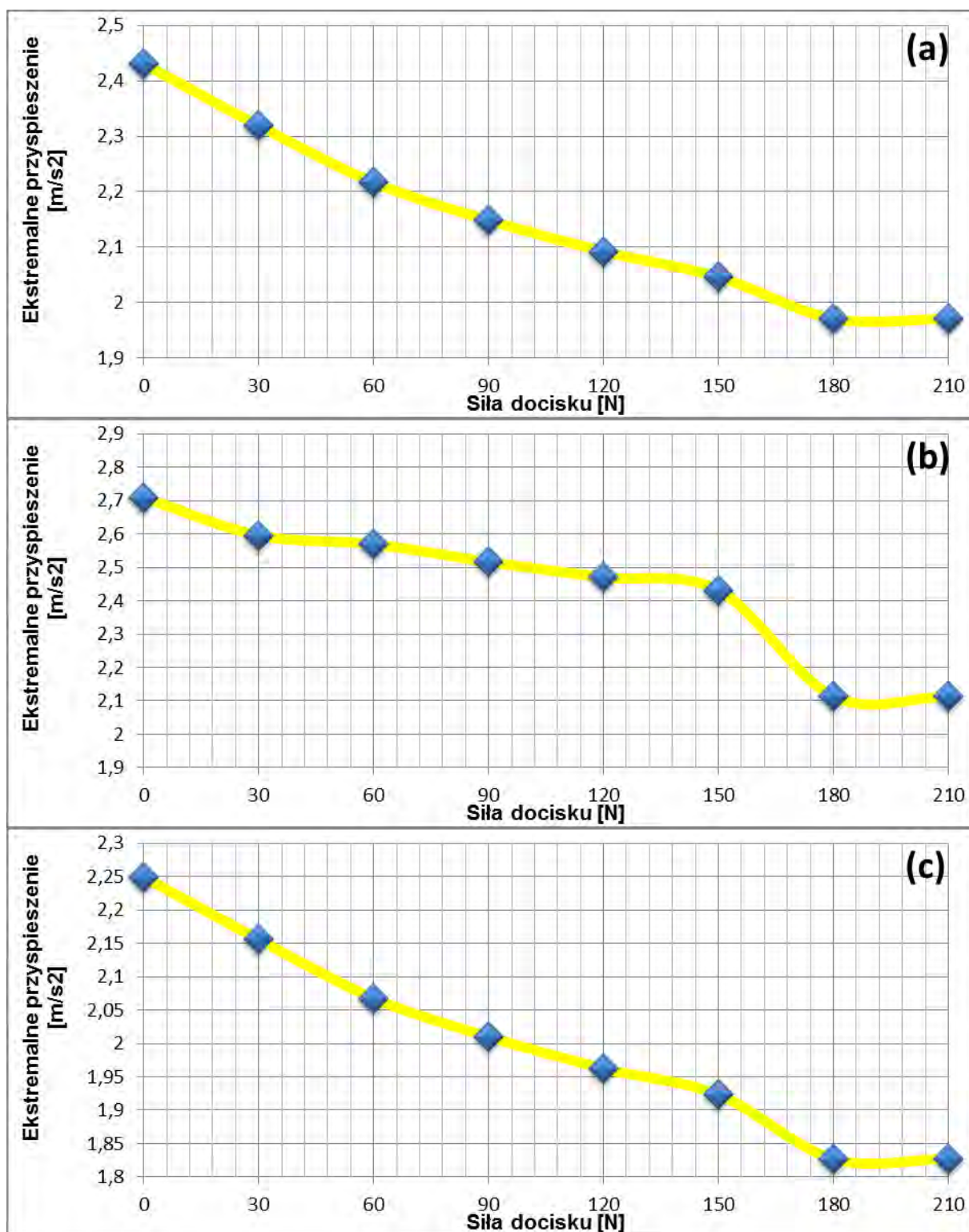
W ostatnim etapie badań numerycznych przeprowadzono analizę parametryczną dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego. Analiza ta miała na celu sprawdzenie wpływu siły docisku strony palcowej do strony stykowej toru prądowego odłącznika na zmianę zachowania się konstrukcji poddanej obciążeniu sejsmicznemu. Analizę przeprowadzono dla trzęsienia ziemi El Centro deklarując obciążenie przebiegami czasowymi

przyspieszeń w trzech kierunkach (składowa NS – kierunek poprzeczny Y, składowa EW – kierunek wzdłużny X, składowa UD – kierunek pionowy Z). Wartość siły ściskającej zmieniano od 0 do 210 N (co 30 N). Dla wartości 210 N w żadnym kroku czasowym nie zaobserwowano poślizgu pomiędzy częścią palcową a częścią stykową toru prądowego. Dalsze zwiększanie siły docisku nie prowadziło do zmiany odpowiedzi konstrukcji odłącznika na skutek działania trzęsienia ziemi El Centro. Przykłady uzyskanych wyników w postaci ekstremalnych wartości przemieszczeń i przyspieszeń punktów referencyjnych na kierunku wzdłużnym X przedstawiono na Rys. 4.71 i 4.72. Odpowiedzi w kierunku poprzecznym Y oraz pionowym Z wykazały niewielkie zmiany dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego odłącznika.

Otrzymane z analizy parametrycznej wyniki (zob. Rys. 4.71 i 4.72) wskazują, iż zwiększenie siły docisku ramion toru prądowego odłącznika prowadzi do istotnej redukcji ekstremalnych wartości przemieszczeń oraz przyspieszeń w kierunku wzdłużnym Y. W przypadku analizowanego trzęsienia ziemi El Centro, redukcja ekstremalnych przemieszczeń przy zmianie siły docisku z 0 do 210 N wyniosła 15,2%, 16,5% oraz 15,2%, odpowiednio dla punktu referencyjnego nr 53710 (szczyt kolumny I), 62229 (szczyt kolumny II) oraz 65464 (środek toru prądowego). Jednocześnie, ekstremalne wartości przyspieszeń w tych punktach referencyjnych w kierunku wzdłużnym Y uległy redukcji o 18,9%, 22,0% i 18,8%.



Rys. 4.71. Ekstremalne przemieszczenia w kierunku wzdłużnym X w zależności od siły docisku strony palcowej do strony stykowej (trzęsienie ziemi El Centro) dla punktu referencyjnego: (a) 53710, (b) 62229, (c) 65464.



Rys. 4.72. Ekstremalne przyspieszenia w kierunku wzdłużnym X w zależności od siły docisku strony palcowej do strony stykowej (trzęsienie ziemi El Centro) dla punktu referencyjnego:

(a) 53710, (b) 62229, (c) 65464.

4.5 Wnioski

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki szczegółowych analiz numerycznych dotyczące zachowania się dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia poddanego wstrząsom sejsmicznym. W pierwszym etapie wykonano analizę modalną w celu weryfikacji dokładności stworzonego modelu numerycznego z zastosowaniem MES. Następnie przeprowadzono trójwymiarową nieliniową analizę dynamiczną przy wymuszeniu zapisami różnych trzęsień ziemi dla konfiguracji zamkniętej oraz otwartej. Przyjęto elastyczno-plastyczne modele materiału dla poszczególnych metalowych elementów konstrukcji oraz założono odpowiednią odporność na kruche pęknięcie w przypadku ceramiki. W analizie uwzględniono ponadto nieliniowość geometryczną, w odniesieniu do stykających się ramion odłącznika zamkniętego, poprzez użycie elementów kontaktowych typu GAP. W ostatnim etapie badań przeprowadzono analizę parametryczną dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego.

Wyniki nieliniowych analiz numerycznych pokazują, iż oddziaływania dynamiczne powstające podczas trzęsień ziemi mogą wzbudzić analizowany odłącznik do drgań o znacznych amplitudach oraz powodować powstanie dużych wartości naprężeń w elementach konstrukcji. Z pośród czterech analizowanych przebiegów czasowych wstrząsów sejsmicznych (El Centro, Kobe, Kushiro, San Fernando) najwyższe poziomy odpowiedzi wystąpiły dla trzęsienia ziemi San Fernando zarówno dla odłącznika w konfiguracji zamkniętej jak i otwartej. Trzęsienie to charakteryzuje się najwyższymi wartościami ekstremalnych przyspieszeń gruntu dla wszystkich trzech składowych przy jednoczesnym szerokim paśmie dominujących częstotliwości uwzględniającym zakres 5-10 Hz, co z pewnością przyczyniło się do znacznego wzbudzenia konstrukcji odłącznika.

Największe wartości naprężeń, wywołane analizowanymi trzęsieniami ziemi, wystąpiły w ramie podstawy odłącznika, w miejscach połączenia ramy podstawy z kolumnami (szczególnie w śrubach łączących) oraz w dolnych częściach kolumn. W przypadku odłącznika w konfiguracji zamkniętej w żadnym punkcie nie doszło do przekroczenia granicy plastyczności w metalowych częściach konstrukcji ani do kruchego pęknięcia części ceramicznych. Z kolei, dla odłącznika otwartego poddanego działaniu trzęsienia ziemi San Fernando zaobserwowano odkształcenia plastyczne w łapach ramy podstawy oraz w śrubach łączących ramę podstawy z kolumną I.

Wyniki analizy parametrycznej przeprowadzonej dla trzęsienia ziemi El Centro dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego wskazują, iż zwiększenie siły docisku prowadzi do poprawy zachowania się konstrukcji podczas wstrząsu sejsmicznego. Stwierdzono również, iż odpowiednio dobrana siła docisku ramion odłącznika w stanie zamkniętym uniemożliwia ich wzajemny przesuw w miejscu styku.

5 Podsumowanie

W niniejszej dysertacji opisano wyniki kompleksowych badań dotyczących identyfikacji dynamicznej i oceny odporności sejsmicznej konstrukcji dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia. Badania objęły szczegółowe testy eksperymentalne, w tym testy zniszczeniowe, oraz dokładne trójwymiarowe analizy numeryczne z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej i geometrycznej.

5.1 Wnioski końcowe

W pierwszej części pracy szczegółowo opisano badania eksperymentalne analizowanej konstrukcji odłącznika. Najpierw przeprowadzono szereg badań impulsowych na sztywnym fundamencie, w celu wyznaczenia dominujących częstotliwości oraz form drgań własnych konstrukcji. Dalsze badania przeprowadzono na stole wstrząsowym, na którym powtórzono testy impulsowe oraz wykonano testy sweep-sine. W ostatniej części rozdziału opisano badania zniszczeniowe mające na celu określenie odporności sejsmicznej analizowanego odłącznika. W wyniku przeprowadzonych badań impulsowych na sztywnym fundamencie otrzymano szereg dominujących częstotliwości oraz form drgań własnych konstrukcji dla konfiguracji zamkniętej i otwartej. Badania modalne przeprowadzone po zamocowaniu odłącznika do platformy stołu wstrząsowego pokazały spadek częstotliwości drgań własnych, ze względu na podatność stołu oraz interakcję drgań pomiędzy stołem a odłącznikiem. W wyniku różnych badań modalnych (badania impulsowe – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza przyspieszeń, badania sweep-sine – analiza naprężeń) przeprowadzonych dla odłącznika zamocowanego na stole wstrząsowym uzyskano bardzo podobne wartości dominujących częstotliwości drgań własnych konstrukcji, co potwierdza skuteczność każdej z użytych metod. Badania zniszczeniowe pokazały, iż rama podstawy oraz dolne części kolumn są miejscami najbardziej wyężonymi na skutek działania obciążeń dynamicznych. Konstrukcja odłącznika uległa trwałemu uszkodzeniu na skutek pęknięcia czopa łożyska w stopie obrotowej u dołu jednej z kolumn.

W drugiej części pracy przedstawiono wyniki dokładnych analiz numerycznych z zastosowaniem MES. Najpierw wykonano analizę modalną w celu weryfikacji dokładności stworzonego modelu numerycznego. Następnie przeprowadzono trójwymiarową nieliniową analizę dynamiczną przy wymuszeniu różnymi wstrząsami sejsmicznymi dla konfiguracji

zamkniętej oraz otwartej odłącznika. W ostatnim etapie badań przeprowadzono analizę parametryczną dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego. Wyniki nieliniowych analiz numerycznych pokazują, iż oddziaływania dynamiczne powstające podczas trzęsień ziemi mogą wzbudzić analizowany odłącznik do drgań o znacznych amplitudach oraz powodować powstanie dużych wartości naprężeń w elementach konstrukcji. Największe wartości naprężeń wystąpiły w ramie podstawy odłącznika, w miejscach połączenia ramy podstawy z kolumnami (szczególnie w śrubach łączących) oraz w dolnych częściach kolumn. W przypadku odłącznika w konfiguracji zamkniętej w żadnym punkcie nie doszło do przekroczenia granicy plastyczności w metalowych częściach konstrukcji, ani do kruchej pęknięcia części ceramicznych. Z kolei, dla odłącznika otwartego poddanego działaniu trzęsienia ziemi San Fernando zaobserwowano odkształcenia plastyczne w łapach ramy podstawy oraz w śrubach łączących ramę podstawy z jedną z kolumn. Fakt ten potwierdza możliwość wystąpienia uszkodzeń konstrukcji odłączników dwukolumnowych podczas dużych trzęsień ziemi. Wskazuje również, iż odłącznik w konfiguracji zamkniętej jest bardziej odporny na oddziaływania sejsmiczne ze względu na fakt, iż obie kolumny połączone na górze torem prądowym wzbudzone są do drgań jednoczesnych. Wyniki analizy parametrycznej przeprowadzonej dla różnych wartości siły ściskającej ramiona toru prądowego wskazują, iż zwiększenie siły docisku prowadzi do poprawy zachowania się konstrukcji podczas trzęsienia ziemi. Przyczyną tego zjawiska jest fakt, iż wraz ze wzrostem siły docisku redukowany jest wzajemny przesuw w miejscach styku ramion, a cały tor prądowy ulega usztywnieniu umożliwiając przenoszenie sił sejsmicznych z jednej kolumny na drugą.

Wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych przedstawione w niniejszej dysertacji potwierdzają tezę podaną w rozdziale 1, iż odporność sejsmiczna dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia zależy przede wszystkim od konstrukcji ramy podstawy oraz dolnych części kolumn i wynika ze sposobu zamocowania kolumn z ramą.

5.2 Uwagi ogólne

Dwukolumnowe poziomoobrotowe odłączniki wysokiego napięcia, ze względu na swoją specyficzną budowę, są konstrukcjami podatnymi dynamicznie. Wyniki opisane w niniejszej dysertacji wskazują iż miejscami krytycznymi tych konstrukcji są m.in. dolne części kolumn,

w których znajdują się stopy obrotowe zamocowane do ramy podstawy śrubami łączącymi (zob. też Dembowski i Jankowski 2011ab, 2012, Dembowski i inni 2010ab). Projektowanie odłączników wysokiego napięcia na obciążenia dynamiczne występujące podczas trzęsień ziemi (szczególnie te o dużej intensywności) jest zatem zadaniem niełatwym zważywszy na fakt, iż stopy kolumn wyposażone są w mechanizm obrotowy i przede wszystkim muszą zapewnić możliwość otwarcia toru prądowego. W przypadku tych urządzeń nie można też przyjmować bezkrytycznie zaleceń norm budowlanych (zob. np. normy: Eurocode 8, UBC), które dopuszczają pewne odkształcenia plastyczne (zob. Green 1981, Wasti i Ozcebe 2003). Urządzenia te muszą pracować w zakresie sprężystym i trwałe odkształcenia plastyczne są niedopuszczalne, ze względu na fakt, iż odłącznik musi być w pełni sprawny po trzęsieniu ziemi.

Wyniki uzyskane z badań eksperymentalnych wskazują, iż po zamocowaniu odłącznika do platformy stołu wstrząsowego nastąpił istotny spadek dominujących częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Należy jednak zwrócić uwagę, iż ze względu na różne sposoby posadowienia odłączników wysokiego napięcia w stacjach elektroenergetycznych (np. na dodatkowym ruszcie stalowym) oraz na wpływ podłoża gruntowego taki spadek częstotliwości drgań własnych może mieć miejsce w rzeczywistości. Dlatego też wskazane jest, aby przed przystąpieniem do testów klasyfikacji sejsmicznej odłącznika na stole wstrząsowym wpływ ten oszacować dla danej, konkretnej lokalizacji urządzenia. Dotychczasowe praktyki w tym zakresie pokazują, iż aspekt ten był często pomijany (zob. np. De Silva 1980, Zembaty i inni 2001, Mosalam i inni 2012).

Analizy numeryczne zachowania się odłączników wysokiego napięcia podczas trzęsień ziemi pozwalają na ograniczenie pracochłonnych i kosztownych testów sejsmicznych umożliwiając zastosowanie MES do modelowania (w zakresie liniowym i nieliniowym) złożonego zagadnienia fizycznego. Otrzymane wyniki wskazują, iż bardzo istotne jest uwzględnienie w modelu numerycznym poślizgu w miejscu styku ramion odłącznika (nieliniowość geometryczna). Zaobserwowano bowiem, iż odpowiedź odłącznika na oddziaływania sejsmiczne wykazuje istotne zmiany w zależności od wartości siły ściskającej przyjętej w modelu numerycznym. Tymczasem efekt ten był dotychczas zupełnie pomijany (zob. np. Paolacci i Giannini 2009, Lü i inni 2012). W niniejszej dysertacji przedstawiono wyniki analiz uzyskane dla konkretnego przykładu dwukolumnowego odłącznika wysokiego napięcia. Analizy numeryczne przeprowadzone dla innego typu odłącznika dwukolumnowego, dla którego otrzymano podobne wyniki, opisano w oddzielnych artykułach naukowych (zob. Dembowski i Jankowski 2010ab).

Literatura

- Adachi T., Ellingwood B.R.: Serviceability of earthquake-damaged water systems: effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 93, pp. 78-88, 2008.
- Anagnos T., Ostrom D.K.: Electrical substation equipment damage database for updating fragility estimates. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 30 January - 4 February 2000, paper no. 2262.
- Bastami M.: Seismic assessment of medium and high voltage power substation equipments. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-17 October 2008, paper ID: 06-0135.
- Bathe K.J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall 1982.
- Bathe K.J., Wilson E.L.: Stability and accuracy analysis of direct integration methods. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 1, pp. 283-291, 1973.
- Burkacki D., Jankowski R.: Badania eksperymentalne parametrów dynamicznych modeli zbiorników stalowych na stole sejsmicznym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, t. 283, s. 341-348, 2012.
- Çağnan Z., Davidson R., Guikema S.: Post-earthquake restoration planning for Los Angeles electric power. *Earthquake Spectra*, vol. 22, pp. 1-20, 2006.
- Cavalieri F., Franchin P., Gehl P., Khazai B.: Quantitative assessment of social losses based on physical damage and interaction with infrastructural systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 41, pp. 1569-1589, 2012.
- Chen W.F., Scawthorn C.: *Earthquake Engineering Handbook*. Boca Raton, USA: CRC Press 2003.
- Chmielewski T., Zembaty Z.: *Podstawy dynamiki budowli*. Warszawa: Arkady 1998.
- Chopra A. K.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall 1995.
- Cimellaro G.P., Reinhorn A.M., Bruneau M.: Framework for analytical quantification of disaster resilience. *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 3639-3649, 2010.
- Clough R.W., Penzien J.: *Dynamics of Structures*. International Edition: McGraw-Hill 1993.

- Dastous J.B.: Guidelines for seismic design of flexible buswork between substation equipment. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 191-208, 2007.
- De Silva C.W.: Seismic qualification of electrical equipment using a uniaxial test. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 8, pp. 337-348, 1980.
- Dembowski P., Jankowski R.: Analiza numeryczna zachowania się odłącznika wysokiego napięcia SGF 245 poddanego obciążeniom sejsmicznym. *Czasopismo Techniczne*, t. 107, s. 23-29, 2010a.
- Dembowski P., Jankowski R.: Numerical analysis of the structural response of disconnecting switch under earthquake excitation. *10th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics – RASD 2010*, Southampton, UK, 12-14 July 2010b, paper ID 58.
- Dembowski P., Jankowski R.: Badania eksperymentalne na stole sejsmicznym dotyczące odporności dynamicznej odłącznika wysokiego napięcia. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, t. 276, s. 25-32, 2011a.
- Dembowski P., Jankowski R.: Response of high voltage disconnecter under seismic excitation - experimental and numerical study. *Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures and Concrete Technology – III Gdansk-Kaiserslautern International PhD Symposium*, Gdańsk, 11-12 July 2011b, pp. 33-40.
- Dembowski P., Jankowski R.: Shaking table experimental study on damage mechanism of the disconnecting switch under seismic excitation. *Key Engineering Materials*, vol. 488-489, pp. 351-354, 2012.
- Dembowski P., Jankowski R., Zembaty Z.: Experimental and numerical study on the behaviour of high voltage disconnecter during earthquakes. *14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Macedonia, 30 August - 3 September 2010a, paper ID 844.
- Dembowski P., Jankowski R., Zembaty Z.: Nieliniowe modelowanie odpowiedzi odłącznika wysokiego napięcia SGF 123 podczas trzęsienia ziemi. *Modelowanie Inżynierskie*, t. 9, s. 55-60, 2010b.
- Der Kiureghian A., Sackman J.L., Hong K.-J.: Seismic interaction in linearly connected electrical substation equipment. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 30, pp. 327-347, 2001.
- Doi T.: Study on the outdoor visual information indicating system raised by wide power failure due to the next Nankai earthquake. *13th World Conference on Earthquake*

- Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August 2004, paper no. 208.
- Doğangün A.: Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, vol. 26, pp. 841-856, 2004.
- Dołęga W.: *Stacje elektroenergetyczne*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2007.
- Dorf R. C.: *The Engineering Handbook*. Boca Raton, USA: CRC Press 2005.
- Duenas-Osorio L., Craig J.I., Goodno B.J.: Seismic response of critical interdependent networks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 285-306, 2007.
- Falborski T., Jankowski R.: Shaking table experimental study on the base isolation system made of polymer bearings. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 24-28 September 2012, paper no. 2119.
- Green N.B.: *Earthquake Resistant Building Design and Construction*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Company 1981.
- Hall F.Z.: Northridge earthquake of 17 January 1994: reconnaissance report. *Earthquake Spectra*. vol. 11, suppl. C., 1995.
- Hall J.F.: Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2006. Vol. 35, pp. 525–545.
- Han Y., Davidson R.A.: Probabilistic seismic hazard analysis for spatially distributed infrastructure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 41, pp. 2141-2158, 2012.
- Harris C.M., Piersol A.G.: *Harris' Shock and Vibration Handbook*. New York, USA: McGraw-Hill 2002.
- Hart G.C., Wong K.: *Structural dynamics for structural engineers*. New York, USA: John Wiley & Sons 2000.
- Hartmann F., Katz C.: *Structural Analysis with Finite Elements*. Berlin, Germany: Springer-Verlag 2004.
- Hughes T.J.R. *The Finite Element Method*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall 1987.
- ISMES.: Seismic tests on disconnector type SGF 245, *Test report, STR-9469.00*, RAT-STR-2231/96, Bergamo-Seriate, Italy, 1996.
- Jankowski R.: Badania dynamiczne modeli konstrukcji budowlanych na stole wstrząsowym. *Czasopismo Techniczne*, z. 2-B/2007, s. 29-37, 2007.
- Jankowski R.: Earthquake-induced pounding between equal height buildings with substantially different dynamic properties. *Engineering Structures*, vol.30, pp.2818-

2829, 2008.

- Jankowski R.: Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 39, pp. 343-353, 2010.
- Jankowski R.: Shaking table experimental study on diagnosis of damage and its evaluation in steel structure. *Key Engineering Materials*, vol. 417-418, pp. 157-160, 2010.
- Jirásek M., Bažant Z.P.: *Inelastic Analysis of Structures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons 2002.
- Junke H., Chunlei Z., Fengli Y., Meigen C.: Application of base isolation in high voltage electrical equipment. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-17 October 2008, paper ID: 05-06-0035.
- Kleiber M.: *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice*. Warszawa - Poznań: Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1985.
- Knight B.T., Kempner L.: A utility's approach to seismically hardening existing high-voltage electrical transmission substation equipment. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August 2004, paper no. 1605.
- Kong D., Reinhorn A.M.: Seismic evaluation and protection of high voltage disconnect switches. *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE)*, Oakland, USA, 28 June - 1 July 2009.
- Leyko J.: *Mechanika ogólna, Dynamika*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN 1997.
- Li H-N., Shi W-L., Wang G-X., Jia L-G.: Simplified models and experimental verification for coupled transmission tower–line system to seismic excitations. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 286, pp. 569-585, 2005.
- Li J., Liu W., Bao Y.: Genetic algorithm for seismic topology optimization of lifeline network systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 37, pp. 1295-1312, 2008.
- Lim H-W., Song J.: Efficient risk assessment of lifeline networks under spatially correlated ground motions using selective recursive decomposition algorithm. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 41, pp. 1861–1882, 2012.
- Lü B-L., Chen L-L., Ye Z-M.: Fragility of disconnect switch subjected to random earthquake ground motions. *Journal of Shanghai University*, vol. 15, pp. 180-184, 2012.
- Mazda T., Otsuka H., Kieda S., Uno K.: A study on damage of transmission steel tower with unequal legs in the chi-chi earthquake Tajwan. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August 2004, paper no. 739.

- Mosalam K.M., Moustafa M.A., Günay S., Takhirov, S.: Substructured dynamic testing of high voltage electrical substation disconnect switches. *2012 Quake Summit, NEES Annual Meeting*, Boston, USA, 9-12 July 2012.
- Musiał E.: *Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne*. Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne 2008.
- Newmark N.: A method of computation for structural dynamics. *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, vol. 85, pp. 67-94, 1959.
- Nuti C., Rasulo A., Vanzi I.: Seismic safety evaluation of electric power supply at urban level. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 245-263, 2007.
- Paolacci F., Giannini R., Seismic reliability assessment of a high-voltage disconnect switch using an effective fragility analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 13, pp. 217-235, 2009.
- Poljanšek K., Bono F., Gutiérrez E.: Seismic risk assessment of interdependent critical infrastructure systems: The case of European gas and electricity networks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 41, pp. 61-79, 2012.
- Pampuch R.: *Zarys nauki o materiałach. Materiały ceramiczne*. Warszawa PWN 1977.
- Saadeghvaziri A.M., Allahverdi N.H., Ashrafi A.: Qualitative assessment of seismic response of internal components of power transformers. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August 2004, paper no. 3252.
- Schiff A.J., Torres-Cabrejos R.E., Yao J.T.P.: Evaluating the seismic reliability of electrical equipment containing ceramic structural members. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 7, pp. 85-98, 1979.
- Shinozuka M., Dong X., Chen T.C., Jin X.: Seismic performance of electric transmission network under component failures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 227-244, 2007.
- Shumuta Y.: Practical seismic upgrade strategy for substation equipment based on performance indices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 209-226, 2007.
- Song J., Der Kiureghian A., Sackman J.L.: Seismic interaction in electrical substation equipment connected by non-linear rigid bus conductors. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 167-190, 2007.
- Song J., Ok S-Y.: Multi-scale system reliability analysis of lifeline networks under earthquake hazards. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 39, pp. 259-279, 2010.

- Stein E., de Borst R., Hughes T.J.R.: *Encyclopedia of Computational Mechanics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons 2004.
- Takhirova S.M., Gilani A.S.J.: Earthquake performance of high voltage electric components and new standards for seismic qualification. *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE)*, Oakland, USA, 28 June - 1 July 2009.
- Tatara T.: *Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2012.
- Tezcan S.S., Ipek M.: A reconnaissance report: 1995.Dinar, Turkey, earthquake. *Engineering Structures*, vol. 18, pp. 906-916, 1996.
- Vanzi I.: Seismic reliability of electric power networks: methodology and application. *Structural Safety*, vol. 18, pp. 311-327, 1996.
- Vanzi I.: Structural upgrading strategy for electric power networks under seismic action. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 29, pp. 1053-1073, 2000.
- Villaverde R., Pardo G.C., Carnalla S.: Ground motion amplification at flange level of bushings mounted on electric substation transformers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 30, pp. 621-632, 2001.
- Wasti S.T., Ozcebe G.: *Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers 2003.
- Wiegel R.L.: *Earthquake Engineering*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall 1970.
- Wriggers P.: *Computational Contact Mechanics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons 2002.
- Xu N., Guikema S.D., Davidson R.A., Nozick L.K., Çağnan Z., Vaziri K.: Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 265-284, 2007.
- Yang S., Zhao J.: An overview of earthquake mitigation of urban power systems. *International Conference on Electrical Engineering*, Hong Kong, 18-20 March 2009.
- Zembaty Z., Kowalski M., Hornung, P. Sejsmiczna kwalifikacja odłączników wysokiego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 77, s. 113-118, 2001.
- Zembaty Z., Jankowski R., Cholewicki A. and Szulc J.: Trzęsienie ziemi 30 listopada 2004 r. na Podhalu oraz jego wpływ na obiekty budowlane. *Inżynieria i Budownictwo*, t. 61, s. 507-511, 2005.
- Zhong Z.H.: *Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems*. Oxford, UK: Oxford University Press 1993.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L.: *The Finite Element Method*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann 2002.

Normy

Eurocode 8: *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization 1998.

PN-EN 60068-3-3: *Badania środowiskowe; Wytyczne; Metody badań sejsmicznych dotyczące wyposażenia*. Warszawa: PKN 2002.

UBC: *Uniform Building Code*. Whittier, USA: International Conference of Building Officials 1997.

PN-IEC 68-2-59: *Badania środowiskowe; Metody prób; Wibracje; Metoda dudnień sinusoidalnych*. Warszawa: PKN 1999.

Strony internetowe

<http://earthquake.tier.org.tw>

<http://peer.berkeley.edu>

<https://www.eeri.org>

<http://www.fema.gov>

<http://www.hapam.pl>

Podziękowania

Autor pracy pragnie podziękować swojemu promotorowi, dr. hab. inż. Robertowi Jankowskiemu, prof. PG, za wszelką pomoc i wsparcie przy prowadzeniu pracy naukowej związanej z doktoratem oraz za wyrozumiałość i cierpliwość. Słowa podziękowania kierowane są również do pana inż. Henryka Michniewicza z Centrum Techniki Okrętowej za pomoc przy wykonaniu badań eksperymentalnych oraz do prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Zembatego z Politechniki Opolskiej za cenne uwagi i sugestie dotyczące prowadzonych badań. Autor pragnie podziękować także firmie HAPAM Poland za współpracę przy realizacji prac badawczych. Najbardziej jednak pragnie podziękować ukochanej żonie za wsparcie duchowe podczas pisania pracy.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2010 jako projekt badawczy własny MNiSW nr N N513 361137. Obliczenia wykonano na komputerach

Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (TASK) w Gdańsku.