

ZBIGNIEW ZEMBATY, MARCIN KOWALSKI

Katedra Mechniki Budowli

Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej

PIOTR HORNING

ABB Zwar, Łódź

Sejsmiczna kwalifikacja odłączników wysokiego napięcia

Wstęp

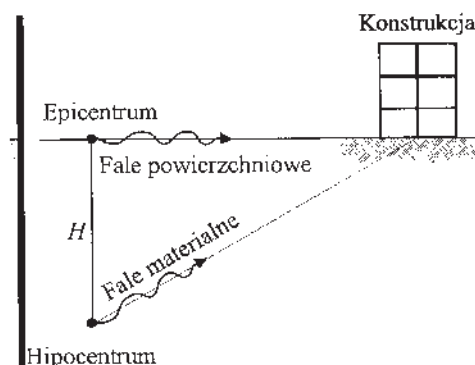
Odłączniki elektryczne jako urządzenia służące do galwanicznego oddzielenia obwodów w stanie otwarcia muszą zapewnić widoczną i bezpieczną przerwę izolacyjną. Najczęściej wykonywane są jako odłączniki dwukolumnowe obrotowe lub jednokolumnowe pantografowe. Taka budowa odłączników powoduje, że są to konstrukcje o niewielkiej sztywności poziomej ze znacznymi masami izolatorów znajdującymi się często na dość dużych wysokościach. Skutkiem tego odłączniki są konstrukcjami wrażliwymi na drgania, czyli, jak określa się to w mechanice, konstrukcjami podatnymi dynamicznie. Świadczą o tym okresy drgań własnych, przekraczające często 1 sekundę. Z tego też powodu w ich projektowaniu należy uwzględnić możliwość powstania drgań i do typowych obciążeń elektrycznych (np. prądy zwarcia) dodać efekty drgań wywołanych wiatrem lub wstrząsami sejsmicznymi.

Właśnie ta ostatnia grupa obciążeń jest często krytyczna w projektowaniu tych urządzeń. Dzieje się tak, gdyż elektrownie i sieć przesyłowa należą do podstawowej infrastruktury kraju, której prawidłowe funkcjonowanie jest szczególnie istotne w czasie klęsk żywiołowych – a takimi są trzęsienia ziemi. Problematyką wpływów sejsmicznych na konstrukcje zajmuje się dziedzina wiedzy zwana inżynierią sejsmiczną. Ze względu na poważne ryzyko sejsmiczne, występujące w wielu krajach, jest to dziedzina obecnie szybko rozwijająca się, a w jej rozwój zaangażowany jest znaczny potencjał naukowy (por. np. monografie [1, 2]).

Tematem niniejszego artykułu jest podsumowanie doświadczeń zdobytych przez Autorów w obliczeniach i kwalifikacji sejsmicznej odłączników wysokich napięć, przeznaczonych dla krajów leżących na obszarach aktywnych sejsmicznie.

Obciążenie sejsmiczne konstrukcji: opis i obliczenia

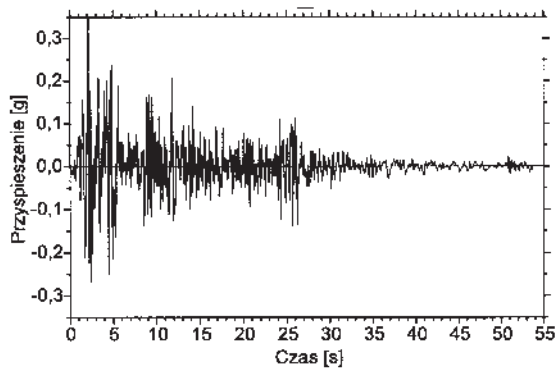
Powstały na głębokości kilkudziesięciu kilometrów (w hipocentrum) wstrząs sejsmiczny powoduje powstanie fal sejsmicznych wywołujących ruch powierzchni gruntu, który jest najsilniejszy w epicentrum (rys. 1). Dla projektanta budowli lub innej konstrukcji istotnym problemem jest założenie poziomu intensywności wstrzą-



Rys. 1. Epicentrum i hipocentrum trzęsienia ziemi oraz konstrukcja na powierzchni ziemi

sów sejsmicznych, oczekiwanych w miejscu posadowienia konstrukcji. Spotyka się różne miary tej intensywności. Najczęściej jest to maksymalne przyspieszenie ruchu gruntu, czasem maksymalna prędkość. Często wykorzystuje się także skalę opisową, np. dwunastostopniową skalę *Mercalliego* zwaną często w literaturze skalą *MM (Modified Mercalli)*.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg poziomej składowej przyspieszeń jednego z typowych, silnych trzęsień ziemi. Maksymalne przyspieszenia przekroczyły w tym przypadku 0,3 g (g – przyspieszenie ziemskie). Analizując rys. 2 łatwo zauważyć, że maksymalne przyspieszenia są jedynie przybliżoną miarą intensywności wstrząsów sejsmicznych. Dzieje się tak, gdyż przy tych samych maksymalnych przyspieszeniach czas trwania wstrząsów, a tym samym stopień „pobudzenia” konstrukcji do drgań, może być różny i wynosić od kilku do kilkudziesięciu sekund. Oprócz tego różny może być widmowy charakter przebiegu wstrząsów. W porównaniu do maksymalnych przyspieszeń jeszcze bardziej przybliżony charakter ma skala *Mercalliego*, ze względu na jej opisowy charakter, klasyfikujący wstrząsy na podstawie ich skutków i subiektywnych wrażeń obserwatorów. Skala ta pozwala jednak w sposób efektywny analizować także historyczne zapiski dotyczące trzęsień



Rys. 2. Przebieg przyspieszeń trzęsienia ziemi El Centro w Kalifornii z 18. maja 1940 r. (S00E)

ziemi, co pozwala na poszerzenie wiedzy o dawnych, katastrofalnych wstrząsach, których ponowne pojawienie się może być oczekiwane na danym terenie. Pełny opis skali MM można znaleźć w monografiach dotyczących inżynierii sejsmicznej lub dynamiki budowli ([1, 4]).

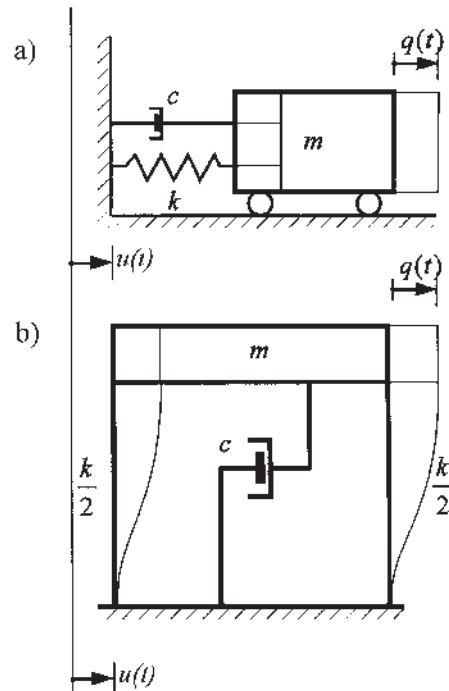
W praktyce przewidywaną intensywność wstrząsów na danym terenie przyjmuje się, sporządzając mapy danego kraju ustalające wartości maksymalnych przyspieszeń podłoża PGA (*Peak Ground Acceleration*) z pewnym okresem powrotu, trwającym najczęściej 50 lat. Np. w USA w najostrzejszej, czwartej strefie sejsmicznej PGA = 0,4 g. Między intensywnością wstrząsów PGA a intensywnością w skali *Mercalliego* ustala się zależności o charakterze statystycznym, które wykorzystuje się w prognozowaniu skutków wstrząsów. Np. VII stopień w skali MM odpowiada w dużym przybliżeniu PGA = 0,1 g. Tak określa się intensywność wstrząsów charakteryzującą lokalne wpływy sejsmiczne. Należy tu dodać, że tzw. *magnituda* wstrząsów, znana jako skala *Richtera*, jest globalną miarą wstrząsów sejsmicznych, charakteryzującą ich wielkość niezależnie od miejsca odbioru. Zgodnie z definicją *magnituda* jest to logarytm dziesiąty maksymalnej wartości przemieszczeń gruntu wyrażonej w mikrometrach (10^{-6} m), zmierzonych w odległości 100 km od epicentrum. Przykładowy wstrząs o sile 7 stopni w skali Richtera skutkować może drganiami w epicentrum o intensywności odpowiadającej ok. IX stopniowi w skali MM, czyli opisanej z dużym przybliżeniem przez PGA = 0,4 g. W pewnej odległości od epicentrum, np. 200 lub 300 km mogą wystąpić zupełnie inne wstrząsy.

Tak, jak przy powiązaniu intensywności PGA z MM, buduje się również pewne, statystyczne zależności między odległością od epicentrum, *magnitudą* i intensywnościami PGA lub MM. Są to jednak zależności bardzo niedokładne, choćby ze względu na zmienną głębokość hipocentrum, czy trudne do dokładnego opisanie efekty propagacji fal sejsmicznych w skorupie ziemskiej.

Jako inżynierską miarę wstrząsów sejsmicznych do projektowania konstrukcji budowli przyjmuje się najczęściej tzw. *spektrum odpowiedzi*. Jest to maksymalne przemieszczenie oscylatora o jednym dynamicznym stopniu swobody (rys. 3a), poddanego wymuszeniu kinematycznemu, przedstawiającemu zapis pewnego trzęsienia ziemi. Maksymalne przemieszczenia, zapisane w funkcji częstości lub okresu drgań własnych tego oscylatora, przedstawiają właśnie *spektrum odpowiedzi*. Oscylator z rysunku 3a jest opisany poprzez swoją masę m , więź sprężystą k i element o charakterze wiskotycznym, tłumiący drgania. Wielkość c oznacza tu współczynnik tłumienia proporcjonalnego do prędkości. Równanie ruchu oscylatora z rysunku 3a ma postać

$$(1) \quad m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = -m\ddot{u}(t)$$

w której $u(t)$ przedstawia zapis poziomego ruchu podłoża, a kropki oznaczają różniczkowanie względem czasu. Dzieliąc obie strony równania (1) przez masę m otrzymamy następujące równanie



Rys. 3. Układ o jednym stopniu swobody poddany wymuszeniu kinematycznemu (a) oraz model prostej konstrukcji o jednym stopniu swobody (b)

$$(2) \quad \ddot{q} + 2\xi\omega_0\dot{q} + \omega_0^2q = -\ddot{u}(t)$$

w którym: $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ – kołowa częstość drgań własnych, $\xi = c/(2m\omega_0)$ – ułamek tłumienia krytycznego ($0 < \xi < 1$).

Na rysunku 3b przedstawiono obraz prostej konstrukcji, której ruch może modelować oscylator z rysunku 3a. Rolę elementu sprężystego spełniają w tym wypadku słupy o poziomych giętych sztywnościach $k/2$ każdy.

Odpowiedź $q(t)$ oscylatora z rysunku 3a można obliczyć za pomocą całki Duhamela:

$$(3) \quad q(t) = - \int_0^t h(\tau) \ddot{u}(t - \tau) d\tau$$

w której impulsowa funkcja przejścia

$$(4) \quad h(\tau) = \frac{1}{\omega_{0d}} \exp(-\xi\omega_0\tau) \sin(\omega_{0d}\tau)$$

a w niej $\omega_{0d} = \omega_0\sqrt{1 - \xi^2}$ jest tłumioną częstością drgań własnych.

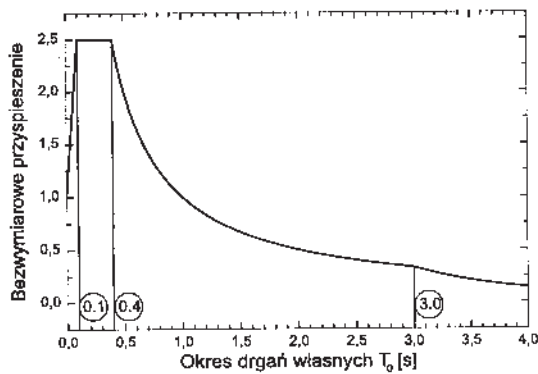
Przemieszczeniowe spektrum odpowiedzi można zatem zapisać jako

$$(5) \quad S_d(\omega_0, \xi) = \max_t |q(t, \omega_0, \xi)|$$

Analogicznie otrzymać można prędkościowe i przyspieszeniowe spektra odpowiedzi jako maksima odpowiednio jej prędkości i przyspieszenia. Do obliczania sił sejsmicznych często wykorzystuje się również spektrum odpowiedzi bezwzględnego przyspieszenia

$$(6) \quad S_{ab}(\omega_0, \xi) = \max_t |\ddot{q}(t, \omega_0, \xi) + \ddot{u}(t)|$$

Spektra odpowiedzi określają maksymalne przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia prostego oscylatora o zadanym tłumieniu na pewne wymuszenie sejsmiczne; stanowią więc miarę jego odpowiedzi sejsmicznej na to wymuszenie. Wymuszenia sejsmiczne różnią się jednak od siebie. Probabilistyczne analizy wstrząsów sejsmicznych wskazują, że zapisy przyspieszeń ruchu gruntu (zapis z rysunku 2) można traktować jak realizacje procesów stochastycznych, a ruch konstrukcji – analizować jako drgania losowe [3]. Takie podejście byłoby jednak zbyt skomplikowane w projektowaniu



Rys. 4. Przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi z Eurokodu 8 dla tłumienia $\zeta = 0,05$

konstrukcji. Zamiast tego, stosując odpowiedni aparat teorii drgań stochastycznych, ustala się pewne uśrednione spektra odpowiedzi, reprezentujące pewną klasę wymuszeń. Tak ustalone spektra odpowiedzi wykorzystuje się w normach sejsmicznych wielu krajów do obliczania przemieszczeń i sił sejsmicznych w konstrukcjach. Rysunek 4 przedstawia przyspieszeniowe spektrum odpowiedzi (wzór 6) z Eurokodu 8, będącego europejską normą sejsmiczną. Spektrum odpowiedzi z rysunku 4 jest przedstawione w funkcji okresu drgań własnych $T_0 = 2\pi/\omega_0$. Analizując odpowiedź oscylatora z rysunku 3 na zadane wymuszenie sejsmiczne, można zauważyć, że w miarę jak okres drgań własnych dąży do zera, oscylator staje się coraz „sztywniejszy” i dla $T_0 = 0$ ruch oscylatora będzie dokładnie odzwierciedlać ruch podłoża $u(t)$.

Wartość przyspieszeniowego spektrum odpowiedzi dla $T_0 = 0$ przedstawia więc maksymalne przyspieszenie podłoża (PGA). Wykres z rysunku 4 jest znormalizowany względem przyspieszeń podłoża i przyjmuje wartość 1 dla $T_0 = 0$. Aby otrzymać spektrum odpowiedzi, odpowiednie dla zadanej wartości PGA, należy przez nią pomnożyć wartość tego wykresu.

Obliczenia odpowiedzi konstrukcji

Przedstawione w poprzednim punkcie: opis wymuszenia sejsmicznego i koncepcja spektrum odpowiedzi układów o jednym stopniu swobody mogą być wykorzystane do wyznaczania odpowiedzi sejsmicznej prostych konstrukcji, dla których układ o jednym dynamicznym stopniu swobody stanowi model o wystarczającym stopniu dokładności. To jednak nie dotyczy wielu często spotykanych konstrukcji, w tym odłączników wysokiego napięcia. Konstrukcje takie modeluje się jako układy o wielu (często tysiącach) stopni swobody, opisując ich ruch za pomocą macierzowych równań ruchu w postaci

$$(7) \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}(t)$$

w których: $\mathbf{q} = \mathbf{q}(t)$ – wektor odpowiedzi, $\mathbf{F}(t)$ – wektor sił wymuszających, będących w przypadku obciążeń sejsmicznych siłami bezwładności, a macierze \mathbf{M} , \mathbf{C} i \mathbf{K} – odpowiednio macierzami bezwładności, tłumienia i sztywności.

Macierze te wyznacza się współcześnie najczęściej za pomocą metody elementów skończonych (MES) przy zastosowaniu odpowiednich programów komputerowych.

Pierwszym etapem wyznaczania odpowiedzi sejsmicznej złożonych konstrukcji jest rozwiązanie tzw. zagadnienia własnego, czyli znalezienie częstości ω i przemieszczeń \mathbf{q} , spełniających równanie nieliniowych drgań swobodnych:

$$(8) \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{0}$$

Częstości te, uszeregowane w porządku rosnącym, tworzą tzw. widmo własne i przedstawiają kolejne częstości rezonansowe $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$. Odpowiadające im wektory przemieszczeń $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2,$

$\mathbf{w}_3, \dots, \mathbf{w}_n$ odwzorowują postacie (formy) drgań własnych. Stanowią one istotną informację o konstrukcji i mogą być wykorzystane do rozwiązania równania (7) metodą transformacji własnej, zwanej również metodą superpozycji postaci drgań. Odpowiada jej wzór

$$(9) \quad \mathbf{q}(t) = -\sum_i \mathbf{w}_i \eta_i \int_0^t h(\tau) \ddot{u}(t-\tau) d\tau$$

w którym

$$(10) \quad \eta_i = \frac{\mathbf{w}_i^T \mathbf{M} \mathbf{r}}{\mathbf{w}_i^T \mathbf{M} \mathbf{w}_i}$$

jest współczynnikiem udziału postaci drgań, a \mathbf{r} – tzw. wektorem wpływu.

Elementy wektora \mathbf{r} zależą od geometrycznej konfiguracji dynamicznego modelu konstrukcji. W najprostszym przypadku jednokierunkowego wymuszenia $u(t)$ i jednokierunkowych odpowiedzi $q_i(t)$ składa się on w całości z jednostkowych elementów.

Zaletą stosowania wzoru (9) do rozwiązania równania (7) polega na tym, że szereg w tym wzorze jest dla wielu konstrukcji (podanych wymuszeniom sejsmicznym) bardzo szybko zbieżny. Pozwala to sprowadzić zadanie o wielu tysiącach stopni swobody do kilku lub kilkunastu równoważnych, dynamicznych stopni swobody.

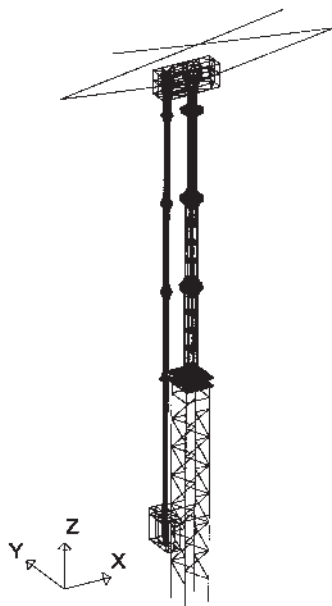
Kolejnym etapem obliczeń sejsmicznych jest wyznaczenie odpowiedzi sejsmicznej metodą numerycznego całkowania równań ruchu lub częściej przy zastosowaniu metody superpozycji postaci drgań. Do wyznaczenia odpowiedzi sejsmicznej złożonych konstrukcji można stosować procedury MES i specjalnie uogólnioną metodę spektrum odpowiedzi, której szczegółowy opis można znaleźć m.in. w monografiach [1,2,4]. W pracach tych omówiono szczegółowo wyznaczanie odpowiedzi sejsmicznej różnych, mniej lub bardziej złożonych konstrukcji.

Odrębnym problemem w analizie sejsmicznej odpowiedzi odłączników jest właściwa interpretacja normatywnych obciążeń sejsmicznych i ustalanie naprężeń dopuszczalnych w różnych częściach odłącznika. W normach sejsmicznych większości krajów zakłada się, że trzęsienia ziemi należą do zjawisk wyjątkowych. W odniesieniu do konstrukcji budowlanych, których dotyczą te normy, dopuszcza się możliwość wystąpienia trwałych odkształceń plastycznych w zakresie nie dopuszczającym do zawalenia się budowli. Budowla może ulec uszkodzeniu w stopniu uniemożliwiającym naprawę, ale życie jej użytkowników nie powinno być zagrożone. Co więcej, sztuka projektowania budowli na terenach sejsmicznych polega w dużej mierze na takim kształtowaniu ich konstrukcji, aby miały one znaczną rezerwę odkształceń plastycznych, przejmujących energię silnych wstrząsów. Taka filozofia w projektowaniu konstrukcji nie może być jednak przyjęta w odniesieniu do odłączników wysokiego napięcia. Konstrukcje te muszą być sprawne bezpośrednio po silnym trzęsieniu ziemi. Właśnie w okresie klęski żywiołowej zachodzi szczególna konieczność wyłączenia i włączenia prądu dla różnych odbiorców. Należy zatem zadbać, aby odpowiedź dynamiczna odłączników pozostawała w zakresie liniowo-sprężystym (lub co najwyżej w zakresie nieliniowo-sprężystym) bez jakichkolwiek trwałych odkształceń plastycznych. Wymaga to uważnego interpretowania danych z norm danego kraju, dotyczących obciążeń sejsmicznych, a w szczególności stwierdzenia, że nie są one zaniżone poprzez przyjęcie z góry założenia o plastycznej pracy konstrukcji, do projektowania której dana norma ma służyć. Podobny problem dotyczy interpretacji maksymalnych naprężeń dla konstrukcji stalowych. W większości norm budowlanych, dotyczących konstrukcji stalowych, stosuje się już metodę stanów granicznych, w której także dla typowych obciążeń statycznych dopuszcza się występowanie stanów plastycznych. Wartości naprężeń dopuszczalnych można znaleźć w starszych normatywach lub ustalać za pomocą współczynnika bezpieczeństwa odniesionego do granicy plastyczności.

Przykład 1. (obliczenia sejsmiczne odłącznika TFB 420)

Jako przykład obliczeniowy rozważymy odpowiedź sejsmiczną odłącznika pantografowego TFB 420-I. Odłącznik ten (wraz ze stalową konstrukcją wsporczą) należało sprawdzić na wymuszenie sejsmiczne, odpowiadające maksymalnym poziomym przyspieszeniom gruntu $PGA = 0,26 \text{ g}$ [5].

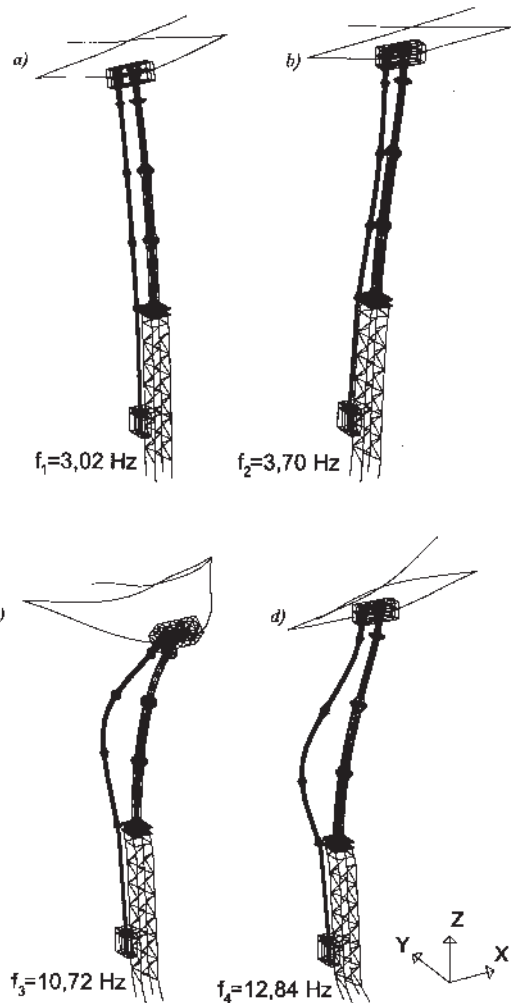
Pierwszym i najbardziej pracochłonnym etapem było sporządzenie modelu obliczeniowego do analizy konstrukcji metodą elementów skończonych. W tym celu wybrano program MES SAP90plus [6]. Rys. 5 przedstawia model MES analizowanego odłącznika z opuszczonym pantografem. Elementy prętowe modelowano za pomocą dwuwęzłowych elementów skończonych typu „frame”, podlegających zginaniu, ścinaniu i odkształceniom osiowym. Porcelanowy izolator podzielono na przestrzenne, ośmiowęzłowe elementy skończone typu „solid”. Łącznie układ miał 3018 dynamicznych stopni swobody. Pominęto wpływ usztywnienia konstrukcji, wnoszony przez przewody doprowadzające prąd, co jest konieczne w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny przewodów, natomiast w odniesieniu do płaszczyzny przewodów jest założeniem konserwatywnym.



Rys. 5. Model MES odłącznika pantografowego typu TFB 420

Następnie rozwiązano zagadnienie własne wyznaczając pierwszych 20 częstości i postaci własnych. Pierwsze dwie postaci drgań są postaciami podstawowymi w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny dwóch izolatorów oraz w płaszczyźnie tych izolatorów (rys. 6 a,b). Następną pięć postaci drgań przedstawia ruch samego, „wiotkiego” i lekkiego pantografu. Postaci te nie mają istotnego wpływu na drgania całego odłącznika, a jak wynikało z dalszych analiz, otrzymane naprężenia w pantografie były znikomo małe. Kolejne dwie postaci drgań przedstawiają drugą postać drgań całego odłącznika odpowiednio w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny dwóch izolatorów oraz w płaszczyźnie tych izolatorów (rys. 6 c,d). Analizowano także odłącznik z podniesionym pantografem oraz (dla porównania) bez pantografu. Ze względu na swoją niewielką masę pantograf miał tylko niewielki wpływ zarówno na zagadnienie własne całego odłącznika, jak i na naprężenia w odłączniku.

W kolejnym etapie wykonano obliczenia odpowiedzi sejsmicznej. Przyjęto spektrum odpowiedzi Eurokodu 8 (rys. 4) w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach x , y , z , przy $PGA = 0,26 \text{ g}$, przy czym wymuszenie pionowe (z) zredukowano do $2/3$ wymuszeń poziomych. Zastosowano metodę spektrum odpowiedzi w wersji zaimplementowanej w programie SAP90plus. W obliczeniach metodą



Rys. 6. Pierwsze cztery częstości i postaci drgań (a-d) odłącznika pantografowego typu TFB 420

superpozycji postaci drgań wykorzystano 20 pierwszych postaci, przy czym w praktyce 4 główne postaci przedstawione na rysunku 6a–d wnoszą 99% całej odpowiedzi sejsmicznej. W sensie dynamicznym całe zagadnienie można było zatem sprowadzić do 4 przestrzennych stopni swobody.

Krytyczne punkty, w których występowały maksymalne naprężenia, to:

- dolna (ceramiczna) część izolatorów ($19,3 \text{ MPa} / 45 \text{ MPa}$)*;
- śruby M16/8,8, mocujące dolne izolatory ($84,5 \text{ MPa} / 400 \text{ MPa}$);
- cztery śruby rektyfikujące M24/8,8, łączące odłącznik z konstrukcją wsporczą ($54,2 \text{ MPa} / 400 \text{ MPa}$);
- dolna część pionowych profili konstrukcji wsporczej ($109 \text{ MPa} / 147 \text{ MPa}$);
- cztery śruby kotwiące konstrukcję wsporczą w fundamencie ($123,4 \text{ MPa} / 147 \text{ MPa}$).

Stwierdzono także, że naprężenia ścinające nie odgrywają istotnej roli w krytycznych przekrojach odłącznika. Można zauważyć, że największą wartość (w stosunku do naprężeń dopuszczalnych) osiągnęły naprężenia w dolnej części konstrukcji wsporczej. A zatem konstrukcja wsporcza decyduje tu o nośności całej konstrukcji odłącznika. Należy tu jednak zauważyć, że obciążenie $PGA = 0,26 \text{ g}$, choć znaczne, nie należy do największych spotykanych obciążeń sejsmicznych. W przypadku niektórych krajów obciążenia te mogą sięgać $0,7 \text{ g}$. Wtedy niezbędna może okazać się modyfikacja konstrukcji samego odłącznika.

*) W nawiasach podano utrzymywane naprężenia normalne oraz odpowiednie naprężenia dopuszczalne.

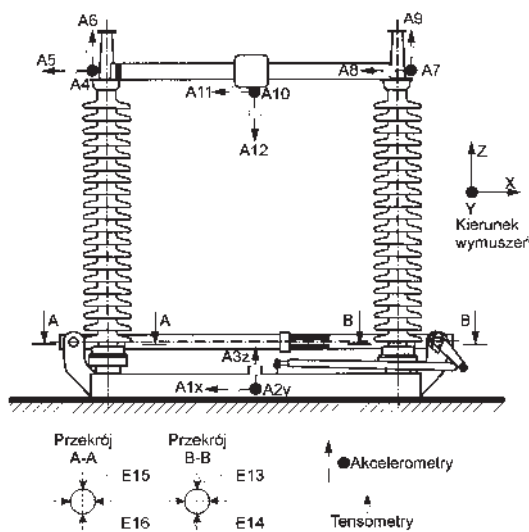
Przykład 2. (kwalifikacja sejsmiczna odłącznika SGF 245 na stole wstrząsowym)

Nie zawsze obliczenia sejsmiczne, takie jak opisane w przykładzie 1, mogą stanowić wystarczającą podstawę do zaakceptowania konstrukcji odłącznika w danym kraju. Czasami, szczególnie przy dużych oczekiwanych intensywnościach wstrząsów, wymaga się dodatkowo przetestowania prototypu odłącznika na stole wstrząsowym. Poniżej przedstawione zostaną wybrane informacje na temat testu kwalifikacyjnego, jakiemu poddany został odłącznik SGF 245 [17]. Test polegał na poddaniu odłącznika trójkierunkowemu wymuszeniu, odpowiadającemu normatywnemu spektrum odpowiedzi dla $PGA = 0,5 g$, oraz zbadaniu własności statycznych i dynamicznych tego odłącznika.

Szczegółowe badania obejmowały:

- a) statyczne próby kalibracyjne porcelanowych izolatorów na poziomą siłę wzrastającą do 50% siły łamiącej (test połączony z zapisem odkształceń);
- b) próby rezonansowe odpowiedzi dynamicznej odłącznika na stole wstrząsowym, przy niewielkim kinematycznym wymuszeniu harmonicznym (5% g) w zakresie 0,1 do 25 Hz;
- c) próby rezonansowe przy powiększonym wymuszeniu harmonicznym (10% g) w zakresie 2 do 25 Hz;
- d) właściwe, trójosiowe próby sejsmiczne w konfiguracji otwartej i zamkniętej.

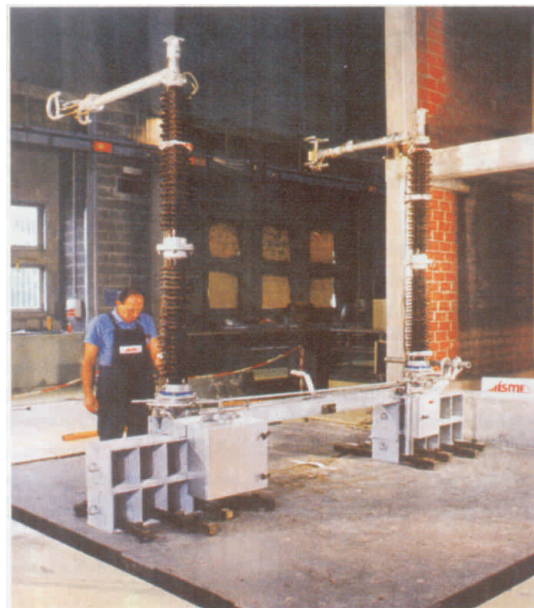
Podczas wszystkich prób i eksperymentów prowadzono zapis przyspieszeń z czujników piezoelektrycznych i odkształceń (dla izolatorów) za pomocą tensometrów. Próby rezonansowe z punktu b wykonano w celu wstępnej oceny właściwości dynamicznych odłącznika, natomiast próby rezonansowe z punktu c wykonane zostały celem dokładniejszego przebadania nieliniowej (geometrycznie) odpowiedzi odłącznika w strefach rezonansowych.



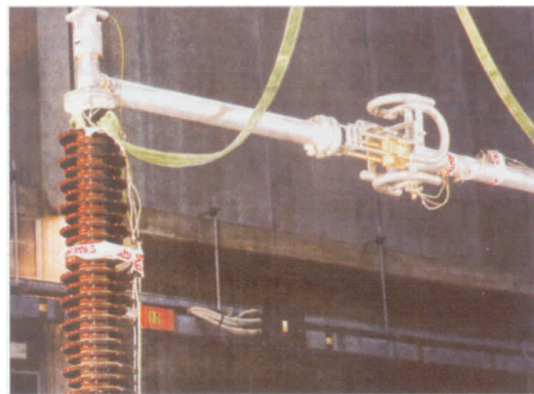
Rys. 7. Rysunek odłącznika SGF 245 wraz z zaznaczonymi czujnikami przyspieszeń i tensometrami

Na rysunku 7 przedstawiono widok odłącznika SGF 245 (w konfiguracji zamkniętej) wraz z zaznaczonymi miejscami zamocowań czujników przyspieszeń i tensometrów. Rysunek 8 przedstawia widok odłącznika na stole wstrząsowym (konfiguracja otwarta). Na rysunku 9 przedstawiono fragment odłącznika w konfiguracji zamkniętej. Powyżej porcelanowego izolatora oraz pośrodku odłącznika (u dołu) można zauważyć zainstalowane czujniki przyspieszeń. Widać także pas zabezpieczający konstrukcję przed ewentualnym zawaleniem w czasie testów wstrząsowych. Rysunek 10 przedstawia szczegół podstawy izolatora. Widać miejsca przyklejenia tensometrów w dolnej części ceramiki.

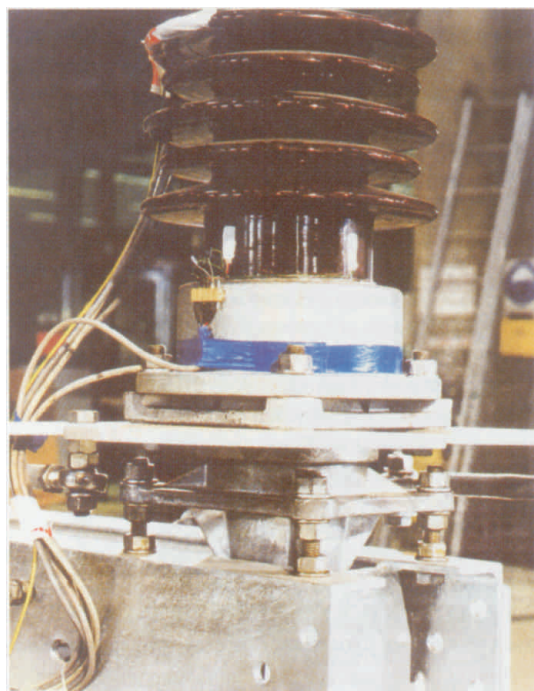
Próby rezonansowe pozwoliły eksperymentalnie ustalić podstawowe własności dynamiczne badanego odłącznika. Na rysunku 11



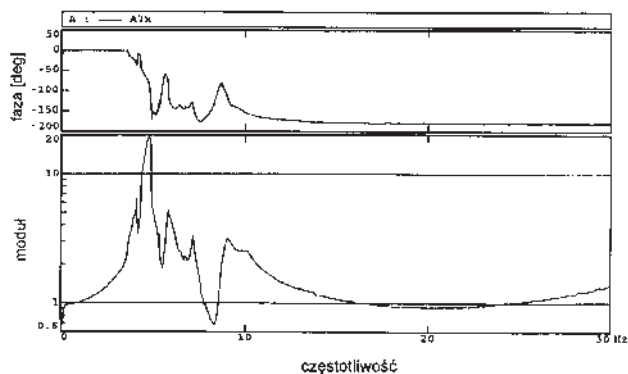
Rys. 8. Widok odłącznika SGF 245 (w konfiguracji otwartej) na stole wstrząsowym



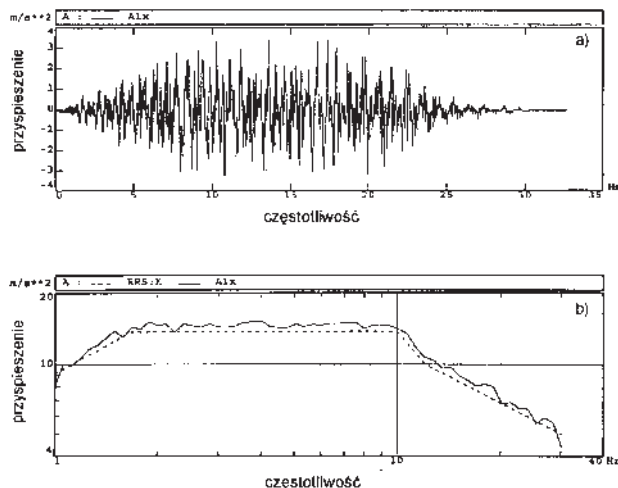
Rys. 9. Szczegół odłącznika SGF 245 (w konfiguracji zamkniętej) w czasie badań na stole wstrząsowym (widać zainstalowane czujniki przyspieszeń oraz pas zabezpieczający konstrukcję przed ewentualnym zawaleniem w czasie testów sejsmicznych)



Rys. 10. Szczegół odłącznika SGF 245 w czasie badań na stole wstrząsowym (widać miejsca przyklejenia tensometrów w dolnej części ceramiki)



Rys. 11. Przebieg odpowiedzi częstotliwościowej odłącznika SGF 245 (w konfiguracji otwartej) zarejestrowanej czujnikiem przyspieszeń A7 w czasie testów rezonansowych przy wymuszeniu harmonicznym w kierunku X (wzdłuż odłącznika)



Rys. 12. Przebieg czasowy przyspieszeń wymuszenia na kierunku X (a) oraz „docelowego” spektrum odpowiedzi (b – linia przerywana) i otrzymanego spektrum odpowiedzi (b – linia ciągła)

przedstawiono przebieg odpowiedzi częstotliwościowej odłącznika w konfiguracji otwartej, zarejestrowany czujnikiem przyspieszeń A7 przy wymuszeniu w kierunku x . Z wykresów na tym rysunku można odczytać kilka częstości rezonansowych. Szczególnie wyraźnie widoczna jest pierwsza częstość własna, wynosząca 4,7 Hz. Próby rezonansowe w konfiguracji zamkniętej wskazały na podstawową częstość własną połączonych konstrukcji, wynoszącą 5,2 Hz.

Trójosiowe próby sejsmiczne zostały wykonane poprzez wygenerowanie trzech (stochastycznie niezależnych) przebiegów wymuszeń kinematycznych, których spektra odpowiedzi były jak najbardziej zbliżone do zadanego spektrum odpowiedzi, przy założeniu, że PGA w kierunku x i y będzie nie mniejsze niż 0,5 g, a w kierunku z – 0,3g (60% redukcji). Na rysunku 12 przedstawiono wygenerowany zapis poziomego wymuszenia (a) oraz spektra odpowiedzi (b) (spektrum zadane – linia przerywana). Mimo osiągnięcia wymaganego spektrum odpowiedzi, PGA wyniosło jedynie około 0,4 g. Dlatego przeprowadzono dodatkowy test przy PGA powiększonym do ponad 0,6 g. Odłącznik przeszedł wszystkie próby bez żadnych uszkodzeń ani trwałych odkształceń. Co ciekawe, największe przemieszczenia odłącznika można było zaobserwować nie dla testów sejsmicznych będących podstawą kwalifikacji, ale dla wymuszenia harmonicznego (10% g) podczas przejścia przez główne rezonanse.

Uwagi końcowe i wnioski

Przeprowadzone obliczenia i eksperymenty prowadzą do następujących wniosków:

- Odłączniki wysokiego napięcia należą do konstrukcji bardzo podatnych na wpływy dynamiczne, w szczególności na obciążenia sejsmiczne;
- Projektując i dostosowując odłączniki do obciążeń sejsmicznych, szczególną uwagę należy zwrócić na ich konstrukcje wspor-

cze, których dobór ma znaczny wpływ na własności dynamiczne odłączników i pozwala w pewnym zakresie uodpornić konstrukcję całego odłącznika na wpływy sejsmiczne;

- Do obliczeń dynamicznych celowe jest stosowanie metody superpozycji postaci drgań ze względu na fakt, że już niewielka ich liczba ma znaczący udział w całej odpowiedzi;

- Zastosowanie metody spektrum odpowiedzi pozwala obliczać odpowiedź odłączników bezpośrednio na zadane spektra odpowiedzi normatywów sejsmicznych danego kraju;

- Odłączniki wysokiego napięcia są urządzeniami, które spełniają szczególną rolę podczas trzęsień ziemi. Dlatego należy stosować specjalne podejście obliczeniowe. W szczególności nie można przyjmować bezkrytycznie zaleceń norm budowlanych, dopuszczających pewne odkształcenia plastyczne. O ile można dopuścić do odkształceń nieliniowo-sprężystych, o tyle trwałe odkształcenia plastyczne są niedopuszczalne, gdyż uniemożliwiłyby późniejszą eksploatację odłącznika po trzęsieniu ziemi, gdy jest duże zapotrzebowanie na sterowanie dystrybucją prądu elektrycznego podczas akcji ratunkowej.

LITERATURA

- [1] Newmark N., Rosenblueth E.: Fundamentals of Earthquake Engineering, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1971
- [2] Clough R.W., Penzien J.: Dynamics of structures, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, 1993
- [3] Zembaty Z.: Vibrations of bridge structure under kinematic wave excitations, *Journal of Structural Engineering, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 123, 1997, pp. 479-488
- [4] Chmielewski T., Zembaty Z.: Podstawy dynamiki budowli, Arkady, Warszawa, 1998.
- [5] Zembaty Z., Kowalski M.: Report on seismic response of pantograph disconnector type TFB 420-1, Opole 1997
- [6] Wilson E. L., Habibullah, A.: SAP90 Plus, Structural Analysis User Manual, Berkely, California, 1992
- [7] Seismic tests on disconnector type SGF 245, report, ISMES Spa, Bergamo-Seriate, October 1996, Italy