

# MODELE NIEZAWODNOŚCIOWE KONSTRUKCJI

## w aspekcie oddziaływań wyjątkowych



**prof. dr hab. inż.  
Antoni Biegus**  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego,  
Politechnika Wrocławska

Budowa strukturalna i model niezawodnościowy ustroju nośnego obiektu ma zasadniczy wpływ na jego bezpieczeństwo – szczególnie w przypadku obciążeń wyjątkowych.

W ocenie oddziaływań wyjątkowych (np. ponadnormatywne obciążenia klimatyczne śniegiem lub wiatrem, pożar, eksplozja gazu itp.) korzysta się z PN-EN 1991-1-7.

Oddziaływania wyjątkowe są zazwyczaj oddziaływaniami krótkotrwałymi, lecz o znaczącej wielkości. Ich wystąpienie w okresie eksploatacji budowli uważa się za mało prawdopodobne, lecz jednak możliwe. W wielu przypadkach konsekwencje wystąpienia obciążeń wyjątkowych mogą być poważne, chyba że podjęto wcześniej odpowiednie środki zaradcze. Główna różnica między oddziaływaniem zmiennym a wyjątkowym polega na rozkładzie obciążenia w czasie. Obciążenie zmienne występuje w całym okresie użytkowania budowli, zmieniając się wielokrotnie w określonych sekwencjach czasowych, a jego wartości mogą być znacznie mniejsze niż wartości obciążeń wyjątkowych. Z kolei oddziaływanie wyjątkowe może najprawdopodobniej w ogóle nie wystąpić w projektowym czasie użytkowania obiektu. Jeśli się zdarzy, to będzie trwało bardzo krótko, od kilku sekund (np. wybuch gazu, uderzenie wózka) do kilku lub kilkunastu dni (np. powódź, wyjątkowe zasypy śnieżne na dachu).

Do obciążeń wyjątkowych o charakterze globalnym zalicza się m.in. ponadnormatywne obciążenie śniegiem lub wiatrem, pożar (rozległy, z udziałem więcej niż jednego mieszkania), zewnętrzna eksplozja gazu lub pyłu, uderzenie wózka lub samolotu w konstrukcję nośną budynku, powódź, lawiny, oddziaływania sejsmiczne. Obciążenia wyjątkowe o charakterze lokalnym to zaś np. pożar jednego mieszkania, wewnętrzny wybuch gazu w mieszkaniu, boczne uderzenie małego samolotu, uderzenie pojazdu drogowego lub szynowego w dolną część budynku, lokalne ponadnormatywne obciążenie śniegiem lub wiatrem.

W projektowaniu obiektu na oddziaływania wyjątkowe imperatywem jest zasada integralności strukturalnej ustroju nośnego obiektu budowlanego, tj. nieuleganie nadmiernemu zniszczeniu w wypadku zdarzeń wyjątkowych (np. wybuchu, uderzenia, następstw ludzkich błędów), których konsekwencje (szkody), byłyby niewspółmierne (nieproporcjonalne) do przyczyny. W tym aspekcie chodzi przede wszystkim o to, aby nie nastąpiła katastrofa postępująca obiektu budowlanego – reakcja łańcuchowa. Spektakularnym przykładem w tym przypadku jest katastrofa hali Międzynarodowych Targów Katowickich (MTK) w Chorzowie. Wyczerpanie nośności przekroju jednego pręta kratownicy dachowej hali MTK spowodowało zniszczenie tego dźwigar dachowego, a to a kolei zapoczątkowało łańcuchową katastrofę całego obiektu (rys. 1) [5]. Konstrukcja hali MTK była ustrojem nośnym o szeregowym modelu niezawodnościowym.

### Modele niezawodnościowe konstrukcji budowlanych

Model niezawodnościowy konstrukcji nośnej obiektu ma bardzo duży wpływ na jego bezpieczeństwo, szczególnie w przypadku wystąpienia losowych oddziaływań wyjątkowych.

W teorii niezawodności konstrukcji budowlanych można wyróżnić dwa podstawowe modele sprzężeń elementów sprawczych: szeregowy i równoległy [2].

W celu identyfikacji modelu niezawodnościowego konstrukcji należy analizować jej zachowanie się w stanie granicznym, a także budowę strukturalną, to jest sprzężenie (wzajemne relacje) elementów sprawczych w systemie nośnym obiektu budowlanego.





Rys. 1. Widok zniszczenia hali Międzynarodowych Targów Katowickich po katastrofie w dniu 28.01.2006 r.

W ustroju nośnym obiektu można wyróżnić przekroje, elementy, węzły i połączenia, których wyczerpanie nośności może doprowadzić do jego geometrycznej zmienności. Nazwano je elementami sprawczymi (krytycznymi). Są one identyfikowane na podstawie wstępnej analizy statycznej konstrukcji.

Analiza ustroju w stanie granicznym nośności konstrukcji polega na badaniu stanu związanego z jego transformacją w mechanizm (zmianą w łańcuch kinematyczny). Mechanizmy zniszczenia konstrukcji wyznacza się na podstawie analizy jej schematu statycznego, to jest geometrii, zidentyfikowanych modeli połączeń w węzłach i podporach oraz zbioru obciążeń oddziałujących na ustrój nośny.

Analizując wrażliwość ustroju nośnego konstrukcji na wystąpienie oddziaływań o charakterze wyjątkowym, należy badać jego model niezawodnościowy.

Każdemu mechanizmowi zniszczenia konstrukcji prętowej można przyporządkowywać minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych, nazywany w skrócie MKZ.

Minimalny krytyczny zbiór to taki, w którym jeśli choć jeden element jest sprawny, to cały zbiór jest sprawny. Bezpieczeństwo konstrukcji rozumiane jest tu jako prawdopodobieństwo niewystąpienia żadnego z analizowanych minimalnych krytycznych zbiorów elementów sprawczych ustroju. W przypadku prętowych systemów konstrukcyjnych minimalne krytyczne zbiory (MKZ) są stowarzyszone z ich kinematycznie dopuszczalnymi mechanizmami zniszczenia (KDMZ). Metody kinematyczne (analiza KDMZ) służą do określenia minimalnych krytycznych zbiorów elementów sprawczych ustroju, do wyznaczenia zaś nośności granicznej konstrukcji służą metody statyki budowli.

Mianem konstrukcji szeregowo złożonych z elementów sprawczych określa się układ, który ulega awarii wówczas, gdy choć jeden element tej konstrukcji zostanie zniszczony. Schemat ideowy niezawodności ta-

kiej konstrukcji przedstawia model rozciąganego łańcucha, składającego się z  $n$  ogniw, pokazany na rys. 2a. Wyczerpanie nośności jednego dowolnego ogniwa łańcucha o nośności granicznej  $N_i$  sprawia, że ustrój przestaje spełniać swą funkcję konstrukcyjną. Są to więc konstrukcje, których nośność wyznacza jedno najbardziej wyęczone ogniwo (element sprawczy). Liczebność minimalnego krytycznego zbioru  $l$  konstrukcji składającej się z  $n$  elementów sprawczych wynosi  $l = 1$ , liczba minimalnych krytycznych zbiorów (MKZ) jest zaś równa liczbie elementów sprawczych  $n$  MKZ (rys. 2b).

Wszystkie konstrukcje statycznie wyznaczalne charakteryzują się tym, że ulegają awarii wówczas, gdy zostanie zniszczony choć jeden element tego ustroju. Takim konstrukcjom przyporządkowuje się szeregowy model niezawodnościowy. Oznacza to, że jeden najsłabszy (najbardziej wyęczone) element sprawczy (przekrój, element, połączenie itp.) decyduje o bezpieczeństwie takiego ustroju i wyczerpanie nośności najsłabszego elementu sprawczego powoduje awarię całego ustroju nośnego obiektu [3], [4], [5]. Przykłady schematów konstrukcji o takim modelu pokazano na rys. 3.

W konstrukcjach o szeregowym modelu niezawodnościowym o ich losowej nośności granicznej  $\bar{N}(\omega)$  decyduje wagowa  $a_i N_i(\omega)$  nośność najsłabszego elementu sprawczego ustroju. Losową nośność graniczną  $\bar{N}(\omega)$  konstrukcji szeregowo złożonej z elementów sprawczych określa zależność:

$$N(\omega) = \min_{i=1}^n a_i N_i(\omega), \quad (1)$$

gdzie  $N_i(\omega)$  – losowa nośność graniczna  $i$ -tego elementu sprawczego konstrukcji,  $a_i$  – waga  $i$ -tego elementu sprawczego konstrukcji [2],  $n$  – liczba elementów sprawczych konstrukcji.

Tak określona losowa nośność graniczna systemu konstrukcyjnego sprowadza się do koncepcji najsłabszego ogniwa w łańcuchu niezawodnościowym, gdyż oczywiste jest, że awarię ustroju generuje element

sprawczy, w którym stosunek losowej nośności granicznej do jego losowego wyłączenia jest największy.

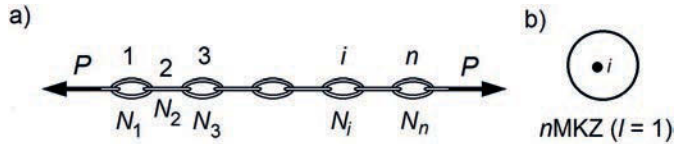
Cechą charakterystyczną, a zarazem bardzo ważną szeregowych systemów nośnych jest ich statystyczne osłabienie [2], [6]. Jego sens fizyczny tkwi w tym, że wraz ze zwiększeniem liczby elementów sprawczych w ustroju prawdopodobieństwo wystąpienia słabszego elementu sprawczego lub losowo większego obciążenia w tym elemencie zwiększa się (im więcej występuje minimalnych zbiorów krytycznych, tym większy jest efekt statystycznego osłabienia konstrukcji). Statystyczne osłabienie takich konstrukcji jest tym większe, im więcej jest elementów sprawczych szeregowo połączonych w systemie nośnym obiektu.

Mianem konstrukcji równoległe złożonej z elementów określa się ustrój nośny, który ulega awarii tylko wtedy, gdy zostanie wyczerpana nośność wszystkich jego elementów sprawczych, wchodzących w skład minimalnego krytycznego zbioru. Schemat ideowy takiego modelu jest przedstawiany w postaci wiązki  $n$  prętów równoległe rozciąganych. Model ten pokazano na rys. 4. W tym przypadku, aby konstrukcja (rys. 4) zmieniła się w mechanizm, zniszczeniu muszą ulec wszystkie ( $n$ ) rozciągane pręty.

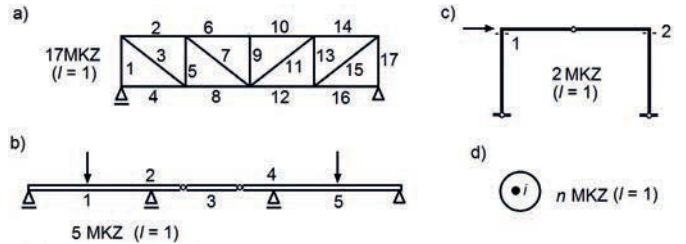
W skład minimalnego krytycznego zbioru konstrukcji o równoległym modelu niezawodnościowym wchodzi  $l > 1$  elementów sprawczych. Dla konstrukcji o takim modelu niezawodnościowym występuje jeden minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych (1 MKZ), a jego liczebność  $l$  jest równa liczbie  $n$  wytypowanych w ustroju elementów sprawczych  $l = n$ .

Cechą wyróżniającą nośność konstrukcji zbudowanej z elementów sprawczych połączonych równoległe z punktu widzenia teorii niezawodności jest wagowe sumowanie się nośności granicznej elementów sprawczych wykonanych z materiału sprężysto-plastycznego. Takiemu modelowi materiału odpowiada stal stosowana na stalowe konstrukcje budowlane według PN-EN 1993. Elementy sprawcze konstrukcji stalowych o przekroju klasy 1 po osiągnięciu nośności granicznej (po uplastycznieniu przekroju) zachowują swą nośność i nie występuje degradacja ich wytrzymałości. W związku z tym, w konstrukcji statycznie niewyznaczalnej, umożliwia to redystrybucję sił wewnętrznych i następuje sumowanie się nośności kolejno uplastycznianych elementów sprawczych (przekrojów krytycznych ustroju nośnego).

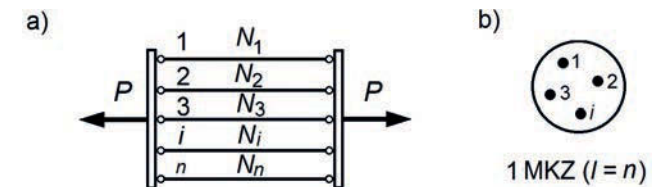
Przykłady konstrukcji złożonych z elementów sprawczych połączonych równoległe z punktu widzenia ich modelu niezawodnościowego pokazano na rys. 5.



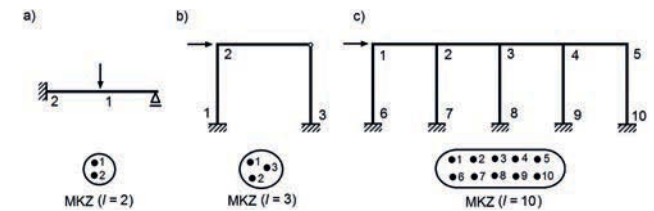
Rys. 2. Szeregowy model niezawodności konstrukcji a) schemat, b) minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych



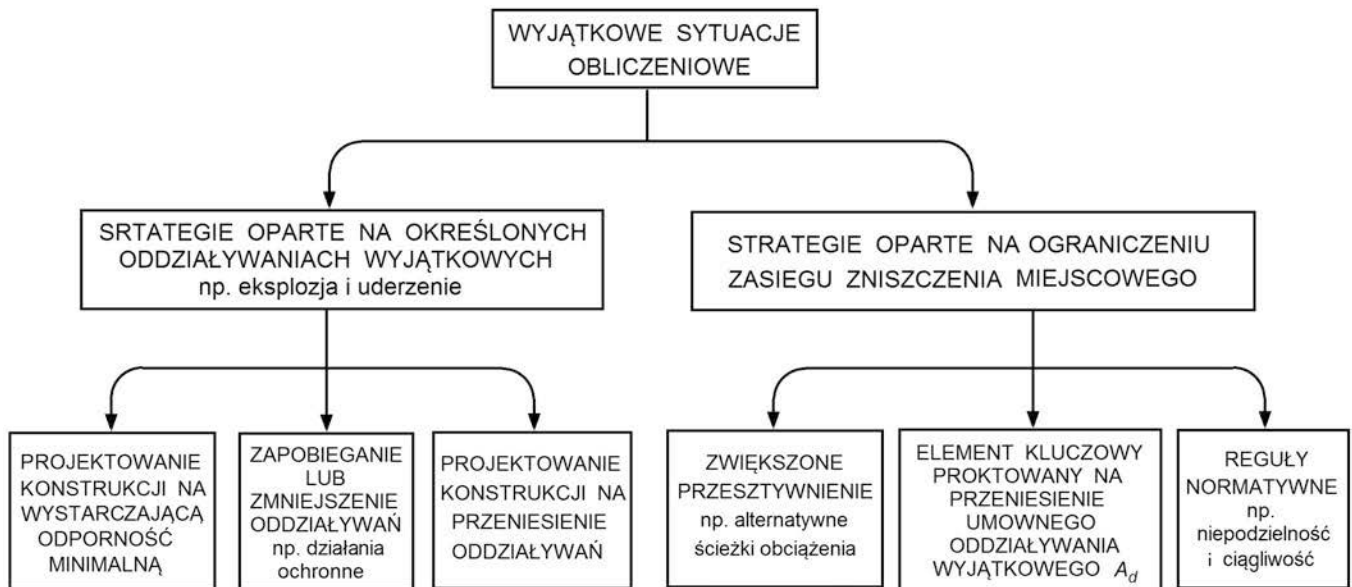
Rys. 3. Przykłady schematów konstrukcji statycznie wyznaczalnych o szeregowym modelu niezawodnościowym, a) kratownica, b) belka, c) rama, d) minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych



Rys. 4. Równoległy model niezawodności konstrukcji a) schemat, b) minimalny krytyczny zbiór elementów sprawczych



Rys. 5. Przykłady schematów konstrukcji statycznie niewyznaczalnych o równoległym modelu niezawodnościowym, a) belka, b) rama jednonawowa c) rama czteronawowa



Rys. 6. Strategie dla wyjątkowych sytuacji obliczeniowych według w PN-EN 1991-1-7

Statycznie niewyznaczalne ustroje nośne są konstrukcjami o równoległym modelu niezawodnościowym. Dzięki zachowywaniu nośności ich elementów sprawczych w granicznych stanach wyężeń, można je obciążać wzrastającym obciążeniem, aż do zmiany konstrukcji w mechanizmy. W kolejnych fazach ich obciążania dochodzi wówczas do wagowego sumowania się nośności elementów sprawczych. Dlatego też losowa nośność graniczna konstrukcji  $N(\omega)$  o elementach sprawczych połączonych równolegle jest określana zależnością:

$$N(\omega) = \sum_{i=1}^n a_i N_i(\omega), \quad (2)$$

gdzie  
 $N_i(\omega)$  – losowa nośność graniczna i-tego elementu sprawczego konstrukcji,  
 $a_i$  – waga i-tego elementu sprawczego konstrukcji [2],  
 $n$  – liczba elementów sprawczych konstrukcji.

Cechą charakterystyczną konstrukcji o równoległym modelu niezawodnościowym, ważną ze względu na bezpieczeństwo budowli, jest statystyczny efekt zwiększania niezawodności systemu [2], [6]. Sens fizyczny omawianego zagadnienia polega na „sprzęganiu” się nośności sprężysto-plastycznych elementów sprawczych systemu konstrukcyjnego. W tym też sensie wraz ze zwiększeniem liczby elementów sprawczych połączonych równolegle zwiększa się niezawodność ustroju nośnego budowli.

Przeciążenie w wyniku np. oddziaływania wyjątkowego konstrukcji statycznie wyznaczalnych (o szeregowym modelu niezawodnościowym) może prowadzić do wystąpienia katastrofy postępującej.

W podsumowaniu można stwierdzić, że w porównaniu do konstrukcji o szeregowym modelu niezawodnościowych ustroje nośne o równoległym połączeniach elementów sprawczych są bezpieczniejsze. Ponadto przeciążenie w wyniku np. oddziaływania wyjątkowego konstrukcji statycznie wyznaczalnych (o szeregowym modelu niezawodnościowym) może prowadzić do wystąpienia katastrofy postępującej. Dlatego też analizując wrażliwość ustroju nośnego konstrukcji na wystąpienie oddziaływań o charakterze wyjątkowym, należy badać jego model niezawodnościowy. Szersze omówienie zagadnień bezpieczeństwa i oceny nośności granicznej prętowych systemów konstrukcyjnych podano w [2].

### Oddziaływania wyjątkowe według 1991-1-7

W PN-EN 1991-1-7 określono strategię oraz reguły dotyczące zapewnienia bezpieczeństwa budynków i innych budowli na wypadek możliwych i niemożliwych do określenia oddziaływań wyjątkowych (oznaczonych w PN-EN 1990 jako A). Zależą one od:

- działań podjętych w celu zapobiegania lub zmniejszania dotkliwości oddziaływania wyjątkowego,
- prawdopodobieństwa wystąpienia określonego oddziaływania wyjątkowego,
- konsekwencji zniszczenia z powodu określonego oddziaływania wyjątkowego,
- percepcji społecznej i poziomu akceptowalnego ryzyka.

W PN-EN 1991-1-7 sprecyzowano i zdefiniowano: strategię oparte na określonych oddziaływaniach wyjątkowych oraz strategię oparte na ograniczeniu zasięgu zniszczenia miejscowego budowli. Rozważane w PN-EN 1991-1-7 strategię dotyczą wyjątkowych sytuacji obliczeniowych przedstawiono na rys. 6.

W odniesieniu do strategii opartych na określonych oddziaływaniach wyjątkowych (np. eksplozjach, uderzeniach) rozważono wyjątkowe sytuacje obliczeniowe w przypadkach:

- projektowania konstrukcji na wystarczającą odporność minimalną,
- zapobiegania oddziaływaniom lub ich zmniejszania (np. działania ochronne) oraz
- projektowania konstrukcji na przeniesienie oddziaływań.

Tabela 1. Definicje klas konsekwencji zniszczenia konstrukcji według PN-EN 1990

Klasa konsekwencji	Opis	Przykłady konstrukcji budowlanych i inżynierskich
CC3	duże zagrożenie życia ludzkiego lub bardzo duże konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	widownie, budynki użyteczności publicznej, których konsekwencje zniszczenia są bardzo duże
CC2	przeciętne zagrożenie życia ludzkiego lub znaczne konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	budynki: użyteczności publicznej, mieszkalne, biurowe, których konsekwencje zniszczenia są przeciętne
CC1	małe zagrożenie życia ludzkiego, małe lub nieznaczne konsekwencje ekonomiczne, społeczne i środowiskowe	budynki rolnicze, w których ludzie zazwyczaj nie przebywają, oraz szklarnie

Tabela 2. Przyporządkowanie klasy konsekwencji budynków według PN-EN 1991-1-7

Klasa konsekwencji	Przykład przyporządkowania rodzaju budynku i sposobu użytkowania
CC1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• domy prywatne nieprzekraczające 4 kondygnacji;</li> <li>• budynki rolne;</li> <li>• budynki, w których ludzie przebywają rzadko, pod warunkiem, że żadna część budynku nie jest bliżej innego budynku lub obszaru, gdzie ludzie faktycznie przebywają, niż w odległości równej 1,5-krotnej wysokości budynku</li> </ul>
CC2a Grupa mniejszego ryzyka	<ul style="list-style-type: none"> <li>• domy prywatne do 5 kondygnacji;</li> <li>• hotele nieprzekraczające 4 kondygnacji;</li> <li>• mieszkania, apartamenty i inne budynki mieszkalne nieprzekraczające 4 kondygnacji;</li> <li>• biura nieprzekraczające 4 kondygnacji;</li> <li>• budynki przemysłowe nieprzekraczające 3 kondygnacji, siedziby sprzedaży detalicznej nieprzekraczające 3 kondygnacji, o powierzchni podłogi mniejszej niż 1000 m<sup>2</sup> na każdej kondygnacji;</li> <li>• jednokondygnacyjne budynki oświatowe;</li> <li>• wszystkie budynki z dostępem publicznym, nieprzekraczające dwóch kondygnacji, które mają powierzchnię podłogi nieprzekraczającą 2000 m<sup>2</sup> na każdej kondygnacji</li> </ul>
CC2b Grupa większego ryzyka	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hotele, mieszkania, apartamenty i inne budynki mieszkalne wyższe niż 4-kondygnacyjne, ale nieprzekraczające 15 kondygnacji;</li> <li>• budynki oświatowe wyższe niż jednokondygnacyjne, ale nieprzekraczające 15 kondygnacji;</li> <li>• siedziby sprzedaży detalicznej wyższe niż 3-kondygnacyjne, ale nieprzekraczające 15 kondygnacji;</li> <li>• szpitale, nieprzekraczające 3 kondygnacji; biura wyższe niż 4-kondygnacyjne, ale nieprzekraczające 15 kondygnacji;</li> <li>• wszystkie budynki z dostępem publicznym, które mają powierzchnię podłogi przekraczającą 2000 m<sup>2</sup>, ale nie większą niż 5000 m<sup>2</sup> na każdej kondygnacji;</li> <li>• parkingi samochodowe nieprzekraczające 6 kondygnacji</li> </ul>
CC3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wszystkie budynki zdefiniowane wyżej jako klasy konsekwencji 2 niższej i wyższej, które przekraczają ograniczenia powierzchni i liczby kondygnacji;</li> <li>• wszystkie budynki, do których ma dostęp znaczna liczba osób;</li> <li>• stadiony mieszczące więcej niż 5 tys. widzów;</li> <li>• budynki, w których przechowuje się niebezpieczne substancje lub prowadzi niebezpieczne procesy</li> </ul>

W omawianej normie przyjęto, że można zaakceptować zniszczenie miejscowe spowodowane oddziaływaniami wyjątkowymi, pod warunkiem, że nie zagrazi to utracie stateczności całej konstrukcji i zapewniona będzie jej całkowita nośność oraz możliwe będzie podjęcie niezbędnych działań ratowniczych. Działania ochronne mogą polegać – np. w przypadku budynków – na zapewnieniu ochronnych elementów upustowych o małej masie i wytrzymałości, w celu zmniejszenia skutków eksplozji. W zakres tych działań włączono też m.in. zastosowanie słupków ochronnych lub barier bezpieczeństwa.

W projektowaniu na oddziaływania wyjątkowe stosowane strategie, oparte na ograniczaniu zasięgu zniszczenia miejscowego, polegają na:

- nadaniu wystarczającej, zwiększonej sztywności konstrukcji w celu umożliwienia przekazywania oddziaływań do alternatywnych ścieżek obciążenia,
- projektowaniu bezpiecznych składników konstrukcji, od których zależy jej stateczność (jako elementów zasadniczych przenoszących oddziaływania wyjątkowe),
- projektowaniu elementów konstrukcyjnych, wykonanych z materiałów o wystarczającej ciągliwości i umożliwiających pochłanianie znacznej energii odkształcenia bez zerwania.

Konstrukcje projektowane z uwzględnieniem oddziaływań wyjątkowych należy analizować w odniesieniu do odpowiednich wyjątkowych sytuacji obciążeniowych, zgodnie z postanowieniami PN-EN 1990. Obliczeniowe efekty oddziaływań  $E_d$  na konstrukcje wyznacza się ze wzoru:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P_k \text{ "+" } A_d \text{ "+" } (\psi_{1,1} \text{ lub } \psi_{2,1}) Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

wyjątkowe
towarzyszące oddziaływania zmienne

↑
↑
↑

oddziaływania stałe
sprężenie
wiodące oddziaływanie zmienne

gdzie:

- $G_{k,j}$  – charakterystyczne oddziaływanie stałe  $j$ ,
- $P_k$  – charakterystyczne oddziaływanie sprężające,
- $A_d$  – obliczeniowe oddziaływanie wyjątkowe,
- $Q_{k,i}$  – wiodące charakterystyczne oddziaływanie zmienne,
- $\psi_{1,1}, \psi_{2,1}, \psi_{k,1}$  – współczynniki kombinacyjne dla wyjątkowej sytuacji obciążeniowej, które zależą od miarodajnej sytuacji obciążeniowej (uderzenie, pożar, stan konstrukcji po zdarzeniu wyjątkowym),
- „+” – oznacza „należy uwzględnić w kombinacji z”,
- $\Sigma$  – oznacza „łączny efekt oddziaływań”.

W odniesieniu do silosów i zbiorników, zgodnie z PN-EN 1991-4, obliczeniowe oddziaływanie wyjątkowe  $A_d$  jest ciśnieniem przy wybuchu lub uderzeniu pojazdu, współczynniki kombinacyjne dla wyjątkowej sytuacji obciążeniowej wynoszą  $\psi_{1,1}, \psi_{2,1} = 0,9$  lub  $0,8$ .

W analizie bezpieczeństwa konstrukcji ze względu na wyjątkowe oddziaływania, tj. w wyjątkowych sytuacjach obciążeniowych, wyróżniono 3 klasy konsekwencji (tab. 1):

- CC1 – małe konsekwencje zniszczenia,
- CC2 – przeciętne konsekwencje zniszczenia,
- CC3 – duże konsekwencje zniszczenia.

W zależności od rodzaju obiektu i konsekwencji zniszczenia jego ustroju nośnego (tab. 2) przyjmuje się różne zasady i strategie zapewnienia bezpieczeństwa oraz adekwatne rozwiązania konstrukcyjne (np. stężenia prętowe lub tarczowe, dobór odpowiednich materiałów, „przesztywnienie” konstrukcji, umożliwiające skierowanie oddziaływań na alternatywne ścieżki przekazywania obciążeń).

W celu ograniczenia lub złagodzenia skutków oddziaływań często projektuje się tzw. elementy „kluczowe” (od których zależy np. stateczność obiektu) na efekty obciążeń wyjątkowych. Należy wówczas wykazać, że budynek lokalnie uszkodzony jest wystarczająco odporny na zniszczenie bez zawalenia się.

W PN-EN 1991-1-7 omówiono oddziaływania wyjątkowe spowodowane uderzeniem pojazdów drogowych (z wyłączeniem uderzeń w konstrukcje lekkie), uderzeniem podnośników widłowych, uderzeniem pociągów (z wyłączeniem uderzeń w konstrukcje lekkie), uderzeniem od statków i twardym lądowaniem helikopterów na dachach. Należy je wyznaczyć na podstawie analizy dynamicznej lub jako reprezentowane przez równoważną siłę statyczną. Przyjęto założenie, że ciało uderzające pochłania całą energię. Ponadto podano równoważne siły statyczne spowodowane uderzeniem samochodowym w elementy konstrukcji wsporczych powyżej lub w sąsiedztwie jezdni, a także uderzeniem samochodem ciężarowym w nadbudowy. Określono też sposób przyjmowania obciążeń spowodowanych uderzeniem podnośników widłowych.

W porównaniu do konstrukcji o szeregowym modelu niezawodnościowym, ustroje nośne o równoległych połączeniach elementów sprawczych są bezpieczniejsze.

W PN-EN 1991-1-7 przedstawiono oddziaływania spowodowane przez eksplozje wewnętrzne w odniesieniu do projektowania wszystkich części budynku i innych budowli. Dotyczy to obiektów, gdzie jest spalany lub przetwarzany gaz lub są składowane albo transportowane materiały wybuchowe, takie jak gaz wybuchowy, płyn tworzący wybuchowe opary lub gaz. Konstrukcje nośne takich obiektów powinny być tak projektowane, aby powstrzymać stopniowe zawalenie się wynikające z eksplozji wewnętrznej. Ponadto należy zastosować rozwiązania konstrukcyjne ograniczające konsekwencję eksplozji.

PN-EN 1991-1-7 zawiera 4 załączniki o charakterze informacyjnym.

Załącznik A określa zasady i metody projektowania budynków, z uwzględnieniem postulatu ograniczenia obszaru zniszczenia miejscowego od nieokreślonej przyczyny, tak aby uniknąć niewspółmiernego zawalenia się.

Załącznik B zawiera wytyczne do planowania i dokonania oceny ryzyka w zakresie budynków i budowli.

Załącznik C podaje wytyczne do przybliżonego projektowania dynamicznego konstrukcji poddanych uderzeniom wyjątkowym przez pojazdy drogowe, pojazdy kolejowe i statki, na podstawie modeli uproszczonych lub empirycznych.

Załącznik D dotyczy eksplozji wewnętrznych pyłów w pomieszczeniach, ładowniach okrętowych i zbiornikach na materiały sypkie, eksplozji gazu oraz eksplozji w tunelach drogowych i kolejowych.

## Uwagi końcowe

Z przedstawionej skróto teorii modeli niezawodności konstrukcji wynika, że nie może być mowy o absolutnym bezpieczeństwie konstrukcji budowlanych. Bezdyskusyjny jest jednak fakt, że budowa strukturalna i model niezawodnościowy ustroju nośnego obiektu ma zasadniczy wpływ na jego bezpieczeństwo – szczególnie w przypadku obciążeń wyjątkowych. Jest to ważne zwłaszcza wtedy, gdy duży jest stopień wykorzystania nośności przekrojów i elementów konstrukcji przy obciążeniach normatywnych. Jeżeli jednak sztywność i przestrzenna stateczność konstrukcji (tj. zastosowano odpowiedni system stężeń) są zabezpieczone, to wyczerpanie nośności jej pojedynczego elementu sprawczego nie musi być tragiczne w skutkach, gdyż może nastąpić praca awaryjna ustroju nośnego przy zmianie jego schematu statycznego. Takie cechy mają prętowe konstrukcje stalowe o równoległym modelu niezawodnościowym. W tym aspekcie konstrukcje statycznie wyznaczalne, o szeregowym modelu, nie mają zapasu nośności po wyczerpaniu nośności pojedynczego elementu sprawczego ustroju.

## LITERATURA

- [1] Biegus A., Podstawy projektowania i oddziaływania na konstrukcje budowlane. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014.
- [2] Biegus A., Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław 1999.
- [3] Biegus A., Awaria stalowego dachu hali produkcyjno-magazynowej spowodowana pożarem. „Inżynieria i Budownictwo” nr 3/2014.
- [4] Biegus A., Mądry D., Awaria i wzmocnienie szedowego dachu hali, „Inżynieria i Budownictwo” nr 7/2009.
- [5] Biegus A., Rykaluk K., Katastrofa hali Międzynarodowych Targów Katowickich w Chorzowie, „Inżynieria i Budownictwo” nr 4/2006.
- [6] Kowal Z., Statystyczne osłabienie i wzmocnienie konstrukcji. „Inżynieria i Budownictwo” nr 7–8/1995.
- [7] PN-EN 1990. Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji.
- [8] PN-EN 1991-1-7:2008. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-7: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wyjątkowe.

**Abstract. Construction reliability models in the aspect of accidental actions.** *The structural build and the reliability model of the bearing system of a building has a substantial impact on its safety - especially in the case of accidental loads.*