

Metoda określania trwałości mostów drogowych

Trwałość obiektów inżynierskich jest definiowana w różny sposób. Na przykład w [9, 19] podano: *Obiekty inżynierskie powinny być tak zaprojektowane i wykonane, aby w przyjętym okresie użytkowania i poziomie utrzymania była zapewniona ich trwałość rozumiana jako zdolność użytkowania obiektu przy zachowaniu cech wytrzymałościowych i eksploatacyjnych, których miernikiem są stany graniczne nośności i stany graniczne użytkowalności.*

Z przytoczonej definicji wynika pewna arbitralność określenia ...w przyjętym okresie użytkowania i poziomie utrzymania oraz fakt, że przyjęty okres użytkowania poszczególnych elementów konstrukcji mostowej i jej wyposażenia jest zróżnicowany i przyjmowany wyłącznie w odniesieniu do tzw. trwałości technicznej.

Nawiązując zatem do tej „urzędowej” definicji, *minimalny poziom akceptowalny* można interpretować jako stan tuż przed osiągnięciem przez konstrukcję lub poszczególne jej elementy jednego z wymienionych stanów granicznych. Byłaby to jednak swoista nadinterpretacja, ponieważ stan bliski jednemu ze stanów granicznych wpływa już wyraźnie na zmniejszenie wymaganej trwałości konstrukcji lub jej pojedynczych elementów.

Z punktu widzenia analizy trwałościowej określenie *bezawaryjne użytkowanie* uwzględnia także zabiegi utrzymaniowe wraz z remontami bieżącymi. Nie zawiera jednak pojęcia remontu głównego, które jest nieprecyzyjne. Aby to uściślić, należy znaleźć odpowiedź na następujące pytania: Czy wymiana pomostu przy zachowaniu dźwigarów jest remontem głównym? Czy zatem, jeśli zachodzi konieczność jego przeprowadzenia, to oznacza koniec trwałości istniejącej konstrukcji? Czy wtedy obiekt rozpoczyna nowy okres wyczerpywania się jego zdolności do pracy wraz z upływem czasu eksploatacji?

Trwałość jest zmienną losową zależną od dwóch funkcji. Jedną jest określona zbiorem wymagań technicznych, a druga zbiorem opisującym warunki pracy mostu. Zbiór wymagań technicznych stanowi zespół warunków koniecznych do poprawnego pełnienia przez most swojej funkcji. Mogą to być warunki bezpieczeństwa ruchu, stateczności położenia, stateczności sprężystej, ograniczenia odkształceń, przemieszczeń czy naprężeń, częstotliwości drgań, rozwarłośc rys, poziomu hałasu itd. Są one najczęściej określane w normach, wytycznych projektowania i użytkowania itd. Opisane wyżej wymagania zmieniają się w czasie skokowo i są rezultatem działań subiektywnych. Natomiast do zbioru opisującego warunki pracy konstrukcji zalicza się czynniki klimatyczno-meteorologiczne, lokalizację mostu, natężenie i strukturę ruchu, rodzaj ochrony antykorozyjnej, rodzaj i stan izolacji oraz systemu odwodnienia, rodzaj i stan urządzeń dylatacyjnych oraz nawierzchni, a także przebieg prac utrzymaniowych. Warunki te są funkcjami losowymi, najczęściej zmiennymi w sposób ciągły w czasie, czyli mają charakter stochastyczny.

Projektowanie na trwałość musi więc obejmować cały okres przewidywanego użytkowania obiektu, wraz z kosztami jego utrzymania i koniecznych napraw, a także rozbiórki. Takie postępowanie jest już w pewnym stopniu wymuszone przez wprowadzenie zapisu do norm PN EN 1990 [22] i PN EN 1991-2 [23] o obowiązku projektowania nowych konstrukcji mostowych na okres 100 lat. Wprawdzie nie sprecyzowano jeszcze dokładnie,

jak to robić, ale prace nad tym już rozpoczęto, bazując na wymaganiach zawartych w innych normach projektowania.

W niniejszym artykule skupiono się na pracach polskich w zakresie trwałości mostów, których początki sięgają lat sześćdziesiątych XX wieku [11]. W Zakładzie Mostów Politechniki Warszawskiej kontynuuje się je do dzisiaj, co znalazło swój wyraz w opracowaniach [5, 7÷9, 15÷18].

Na podkreślenie zasługują także prace prowadzone na Politechnice Wrocławskiej [3, 4] oraz w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów i Uniwersytecie Zielonogórskim [12÷14].

Jest rzeczą oczywistą, że może to prowadzić i zwykle prowadzi do rozwiązań nieco droższych od projektowanych tradycyjnie, ale w ostatecznym rozrachunku – znacznie tańszych, wzięwszy pod uwagę oszczędność szeroko rozumianych kosztów eksploatacji w całym okresie użytkowania obiektu oraz możliwość powtórnego użycia części materiałów odzyskanych w wyniku rozbiórki obiektu [6, 10].

Czynniki wpływające na trwałość mostów

Trwałość mostów zależy od wielu czynników. Kluczowy w analizie trwałościowej jest ich dobór i przyporządkowanie do odpowiednich kategorii. Wyciągając wnioski z setek publikacji i referatów oraz biorąc pod uwagę doświadczenia autorów i zespołu Zakładu Mostów Politechniki Warszawskiej, zdecydowano się na stworzenie czterech kategorii trwałościowych, omówionych niżej. Niektóre z nich są „mieralne”, inne nie. Ten fakt powoduje, że są dwie drogi przeprowadzania analizy trwałościowej. Według pierwszej arbitralnie określa się trwałość wyjściową i współczynniki opisujące poszczególne kategorie trwałościowe. W drugim podejściu stosuje się analizę statystyczną w celu wyznaczenia krzywych degradacji i w następnym kroku określenia wspomnianych współczynników [1, 9, 15].

• **Materiał konstrukcyjny.** Punktem wyjścia do określenia trwałości obiektu jest określenie trwałości materiału konstrukcyjnego. Rezultaty badań laboratoryjnych w celu określenia przebiegu procesu starzenia się materiałów są niesatysfakcjonujące. W wielu eksploatowanych obiektach mostowych proces ten przebiega inaczej. Ponieważ brak jest wystarczających danych, ze statystycznego punktu widzenia, okres trwałości materiału określono na podstawie doświadczenia inżynierskiego.

Należy dodać, że konstrukcje mostowe są coraz częściej zbudowane więcej niż z jednego materiału (beton, stal, drewno, aluminium, kamień, cegła, kompozyty polimerowe). Wskazane jest zatem uwzględnienie wzajemnego wpływu tych materiałów. Może to prowadzić do znaczących różnic w trwałości poszczególnych materiałów konstrukcyjnych mostu.

• **Rodzaj konstrukcji.** Popularnym sposobem pokazania wpływu rozwiązania konstrukcyjnego na trwałość całej konstrukcji lub jej elementu jest określenie wytrzymałości zmęczeniowej [12, 13]. Fizycznym wyrazem tego są tzw. karby (geometryczne lub strukturalne).

Należy dodać, że innym ważnym czynnikiem w przypadku mostów betonowych jest także technologia realizacji konstruk-

cji. Trwałość konstrukcji wykonanych „na mokro” istotnie różni się od wybudowanych z prefabrykatów. Istotna jest też klasa betonu oraz rozwartość i charakter rys [4÷6, 24].

W tej kategorii trwałościowej jest konieczne także uwzględnienie odpowiedzi konstrukcji na oddziaływania obciążeń ruchomych w zależności od rozpiętości przęsła jako całości bądź poszczególnych jego elementów składowych. Dotyczy to w szczególności konstrukcji stalowych starego typu, w mniejszym stopniu stalowych pomostów uzebrowanych (ortotropowych), a najmniej pomostów w postaci płyty betonowej. Ważnym czynnikiem jest grubość płyty pomostu, zarówno stalowej, jak i betonowej. Za to wytrzymałość stali ma mniejszy wpływ na trwałość.

• **Warunki eksploatacji.** Warunki eksploatacji są ściśle związane z rzeczywistym ruchem komunikacyjnym. Ważne jest określenie natężenia ruchu, jaki odbywał się po obiekcie do dnia wykonania analizy trwałościowej oraz jaka jest prognoza ruchu w przyszłym okresie eksploatacji. Z punktu widzenia trwałości konstrukcji mostowej jest konieczne jeszcze przetransponowanie tych danych na wartości nacisków pojazdów na konstrukcję mostową, czyli opracowanie tzw. widma obciążeń.

Szczególnie istotne są obciążenia pojazdami ciężkimi. W ramach analiz natężenia i struktury ruchu jest określane m.in. obciążenie sieci dróg wyrażone w liczbie osi obliczeniowych pojazdów ciężkich na dobę na pas obliczeniowy. Także stosunek obciążeń krótkotrwałych do obciążeń całkowitych oraz liczba przejazdów pojazdów ponadnormatywnych jest ważnym miernikiem trwałości.

Przyszłe natężenie ruchu drogowego, a zarazem przewidywane obciążenia na obiektach mostowych, można prognozować. Zwiększenie ruchu idzie w parze z tempem rozwoju kraju, a zatem prognozy wzrostu PKB mogą być traktowane, choć z pewną dozą nieufności, jako miernik rozwoju ruchu drogowego.

• **Warunki środowiskowe i jakość utrzymania.** Stan techniczny mostu zależy także od stanu nawierzchni, izolacji, sprawności systemu odwodnienia, szczelności urządzeń dylatacyjnych, stopnia intensywności korozji i miejsc jej występowania [7, 12÷14] oraz szeroko rozumianej jakości utrzymania. Ważnym czynnikiem jest także środowisko w miejscu lokalizacji obiektu, a także warunki eksploatacji, np. solenie nawierzchni zimą oraz utrzymanie obiektu w czystości. Ocenę agresywności środowiska czy wpływu korozji na nośność konstrukcji mostów zawierają odpowiednio prace [12, 14, 24] i stosowne opracowania IBDiM.

Opis metody określania trwałości mostów

Przedstawiona niżej metoda określania trwałości narzuca na początku konieczność arbitralnego określenia „trwałości wyjściowej”, a następnie skorygowania jej za pomocą współczynników uwzględniających różne okoliczności pracy obiektu. Wartości tych współczynników przyjmuje się obecnie z uwagi na brak danych z wystarczająco długiego czasu (minimalny okres to 30 lat) przede wszystkim na podstawie doświadczenia inżynierskiego, czyli w sposób arbitralny. Sposób ich określania jest kluczowy w odniesieniu do jakości rezultatów analizy, gdyż decyduje o jej dokładności.

Najlepszym rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie krzywych degradacji [1, 9, 15, 16], które powinny być stworzone na bazie ocen stanu technicznego obiektów mostowych, co jest zapisywane w księgach tych obiektów, ale nie zawsze w postaci umożliwiającej analizy statystyczne. Mając świadomość niedoskonałości obecnych uregulowań, a jednocześnie odczuwając nacisk zarządców obiektów mostowych na znalezienie dokładniejszego sposobu określenia ich trwałości, opracowano przedstawiony niżej algorytm. Zilustrowano go dwoma przykładami i jednocześnie wskazano drogę do poprawy jakości wyników.

Punktem wyjścia do analizy był podział na kategorie trwałościowe podany najpierw w [11], potem skorygowany w [9], następnie w [15, 16] i w końcu przekształcony w [17, 18] oraz przedstawiony w niniejszym artykule.

Doświadczenie inżynierskie, jak również chęć skorelowania analizy trwałościowej z istniejącym systemem oceny stanu technicznego mostów doprowadziły do stwierdzenia, że podstawowym kryterium jest rodzaj materiału konstrukcyjnego. Założono ponadto, że stan techniczny pomostu i dźwigarów ma decydujący wpływ na trwałość obiektu. Stan pozostałych elementów ma znaczenie drugorzędne, ale jest również uwzględniany w analizie.

W proponowanej strukturze cztery kategorie trwałościowe oznaczono literami A÷D, przy czym kategoria A służy do ustalenia trwałości wyjściowej, natomiast B, C i D są podstawą do określenia wartości współczynników λ_B , λ_C i λ_D .

• **Kategoria A – materiałowa.** Elementem podstawowym w tej kategorii jest trwałość wyjściowa, czyli maksymalna trwałość materiału, z którego wykonano elementy konstrukcji nośnej obiektu mostowego. Podany w tabl. 1 czas eksploatacji odnosi się do materiałów wytwarzanych współcześnie. Oczywiście jest, że postęp technologiczny w zakresie inżynierii materiałowej spowodował zwiększenie trwałości materiałów konstrukcyjnych. Nie należy jednak zapominać, że jeszcze niedawno przyjmowano trwałość mostów betonowych równą 60 lat, a stalowych 80 lat. Z kolei drewno tradycyjne mogło być eksploatowane nie dłużej niż 15 lat, a nowe metody impregnowania pozwalają wydłużyć ten okres co najmniej do 30 lat, a nawet dłużej. Dlatego w celu określenia rzeczywistej trwałości, a co za tym idzie trwałości wyjściowej w prezentowanym algorytmie, jest ważne wzięcie pod uwagę daty oddania obiektu do eksploatacji i znajomość historii jego użytkowania.

Tablica 1
Trwałość wyjściowa T_0 materiałów konstrukcyjnych

Materiał	Czas eksploatacji [lat]
Stal	120
Beton	80
Drewno tradycyjne*	30
Drewno klejone*	50
Aluminium*	100
Kompozyty polimerowe*	100
Kamień*	1000
Cegła*	100

* Przedstawiany niżej algorytm wymaga uzupełnienia w odniesieniu do tych materiałów.

• **Kategoria B – konstrukcyjna.** Istotne w tej kategorii są zarówno ocena stanu technicznego, jak i przyjęte przez projektanta rozwiązanie techniczne (klasy konstrukcyjne) takich elementów, jak np. pomost, dźwigary czy przeguby *Gerbera*. Mając to na uwadze, w celu określania współczynnika λ_B należy skorzystać z tabl. 2÷4. Należy zauważyć, że w przypadku mostów stalowych za kryterium podziału służył przede wszystkim rodzaj pomostu, przy czym w osobnej grupie ujęto obiekty wybudowane ze stali historycznych. Mosty betonowe podzielono na żelbetowe i sprężone, a następnie brano pod uwagę trzy kryteria: klasę betonu, grubość elementu i rozwartość rys [24]. Nie wyodrębniono kategorii mostów prefabrykowanych.

• **Kategoria C – obciążeniowa.** Miarą obrazującą tę kategorię trwałościową jest współczynnik λ_C . Wskaźnikiem służącym do określenia jego wartości jest „objętość obciążenia”, które przeniósł most podczas swojego „życia”, czyli tzw. widmo obciążeń.

Tablica 2
Klasy konstrukcyjne mostów stalowych

Klasa	Rodzaj przęsła	λ_{Bs}
1	nitowane, wykonane ze stali zgrzewnej lub stali zlewnej wyprodukowanej przed 1920 r.	1,25
2	z pomostami innego typu niż stalowe uźebrowane i zespolone	1,20
3	ze stalowymi pomostami uźebrowanymi	1,10
4	zespolone typu stal-beton	1,00

Tablica 3
Klasy konstrukcyjne mostów żelbetowych

Klasa	Rodzaj przęsła	λ_{Bb}
1	- z betonu klasy C25/30 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,2$ mm	1,29
2	- z betonu klasy C25/30 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,2$ mm	1,26
3	- z betonu klasy C25/30 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,2$ mm	1,23
4	- z betonu klasy C25/30 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,2$ mm	1,20
5	- z betonu klasy C25/30 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,2$ mm	1,09
6	- z betonu klasy C25/30 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,2$ mm	1,06
7	- z betonu klasy C25/30 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,2$ mm	1,03
8	- z betonu klasy C25/30 > 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,2$ mm	1,00

Ponieważ w Polsce do wyjątków należą takie opracowania, to w przypadku mostów drogowych należy skorzystać z wyników wieloletnich pomiarów ruchu i stworzyć mapę sumarycznych natężeń ruchu na drogach. Aby taka mapa mogła być podstawą do obliczeń współczynnika λ_C , jest konieczne przeliczenie danych dotyczących natężenia ruchu na sumaryczne naciski, jakie przejął obiekt mostowy w ciągu całego okresu eksploatacji.

Podobną operację można by zastosować także do obliczenia natężeń ruchu oraz „widm obciążeń” mostów zlokalizowanych w ciągu linii kolejowych.

Aby jednak zilustrować możliwości algorytmu przykładem obliczeń, wzięto dane pomierzone w Niemczech z lat dziewięćdziesiątych XX wieku (tabl. 5).

• **Kategoria D – utrzymaniowo-środowiskowa.** Kategoria ta określa wpływ na stan techniczny obiektu mostowego i uwzględnia:

- rodzaj i jakość zabezpieczenia antykorozyjnego (w przypadku mostów stalowych rodzaj i grubość powłoki zabezpieczającej przed korozją, a w przypadku mostów betonowych grubość otuliny);
- agresywność środowiska;
- jakość utrzymania (stan techniczny urządzeń dylatacyjnych, izolacji i systemu odwodnienia).

Tablica 4
Klasy konstrukcyjne sprężonych mostów betonowych

Klasa	Rodzaj przęsła	λ_{Bb}
1	- z betonu klasy C30/37 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,1$ mm	1,29
2	- z betonu klasy C30/37 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,1$ mm	1,26
3	- z betonu klasy C30/37 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,1$ mm	1,23
4	- z betonu klasy C30/37 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r > 0,1$ mm	1,20
5	- z betonu klasy C30/37 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,1$ mm	1,09
6	- z betonu klasy C30/37 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d < 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,1$ mm	1,06
7	- z betonu klasy C30/37 < 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,1$ mm	1,03
8	- z betonu klasy C30/37 ≥ 30 - mający niektóre lub wszystkie elementy o grubości $d \geq 18$ cm - z rysami o rozwarości $r \leq 0,1$ mm	1,00

Tablica 5
Wartości współczynnika λ_C

Klasa obciążenia	1	2	3	4	5
KV	15·10 ⁶	10·10 ⁶	4·10 ⁶	2·10 ⁶	0,2·10 ⁶
λ_C	1,96	1,71	1,26	1,0	0,465

W analizie trwałościowej określa się tę kategorię za pomocą współczynnika λ_D według wzoru

$$\lambda_D = \lambda_{DS} \lambda_{DU} \lambda_{DUD} \lambda_{DIZ} \lambda_{DSO}, \quad (1)$$

w którym:

λ_{DS} – współczynnik wpływu środowiska korozyjnego,

λ_{DU} – współczynnik jakości utrzymania,

λ_{DUD} – współczynnik stanu technicznego urządzenia dylatacyjnego,

λ_{DIZ} – współczynnik stanu izolacji,

λ_{DSO} – współczynnik stanu technicznego systemu odwodnienia mostu.

Współczynniki λ_{DS} i λ_{DU} są ze sobą powiązane. Starając się oszacować trwałość konstrukcji z uwagi na zagrożenie korozyjne, należy traktować konstrukcję i środowisko jako integralny, sprężony i nierozłączny układ „materiałowo-środowiskowy”, w którym po stronie materiałowej występuje „odporność materiału”, a po stronie środowiskowej „agresywność środowiska”.

Aby określić współczynnik λ_{DS} , zależny od stopnia agresywności środowiska, należy skorzystać z danych tabl. 6.

W przypadku konstrukcji mostu stalowego już eksploatowanego, w którym powłoki antykorozyjne uległy zniszczeniu, przy określaniu λ_{DU} należy skorzystać z tabl. 7 [7].

Wartości charakterystyk geometrycznych podanych w tabl. 7 w przypadku przekroju nominalnego należy wyznaczyć na podstawie pomiarów geometrycznych w miejscach nieskorodowanych. Ze względu na zmiany w geometrii spowo-

dowane ubytkami korozyjnymi charakterystyki geometryczne i wytrzymałościowe należy wyznaczyć z uwzględnieniem przesunięcia osi obojętnej w przekroju skorodowanym.

Tablica 6

Współczynnik λ_{DS} zależny od stopnia agresywności środowiska

Klasa agresywności środowiska według PN-EN ISO 12944:2001		Wartość współczynnika λ_{DS}
Kategoria korozyjności	Przykłady typowych środowisk (tylko informacyjnie)	
C1 bardzo mała	atmosfery w małym stopniu zanieczyszczone – głównie tereny wiejskie	1,010
C2 mała	atmosfery miejskie i przemysłowe, średnie zanieczyszczenie tlenkiem siarki (IV) – obszary przybrzeżne o małym zasoleniu	1,020
C3 średnia	obszary przemysłowe i obszary przybrzeżne o średnim zasoleniu	1,031
C4 duża	obszary przemysłowe o dużej wilgotności i agresywnej atmosferze	1,042
C5-I bardzo duża (przemysłowa)	obszary przemysłowe o dużej wilgotności i agresywnej atmosferze	1,053
C5-M bardzo duża (morska)	obszary przybrzeżne i oddalone od brzegu w stronę morza o dużym zasoleniu	

Tablica 7

Współczynnik λ_{DU} w zależności od rodzaju korozji

Rodzaj korozji	Współczynnik λ_{DU}
Nierównomierna Wzrówna	λ_{DU} przyjętą jako średnią arytmetyczną w_i parametru korozyjnego dźwigarów obliczoną ze wzorów *) $w_{id} = W_{id, nom} / W_{id, kor}$ oraz $w_{ig} = W_{ig, nom}$
Równomierna	1,031
Podpowłokowa Szczelinowa Przyspoinowa	1,010

*) w_{id} , w_{ig} – parametry korozyjne dźwigara i .
 $W_{id, kor}$, $W_{ig, kor}$ – wskaźniki wytrzymałości przekroju na zginanie skorodowanego dźwigara i względem włókien dolnych i górnych.
 $W_{id, nom}$, $W_{ig, nom}$ – wskaźniki wytrzymałości przekroju na zginanie nieskorodowanego dźwigara i względem włókien dolnych i górnych.

W przypadku mostu betonowego (bez rozróżnienia podziału na żelbetowe i sprężone), przy określaniu λ_{DU} należy skorzystać z tabl. 8. W tym przypadku nie rozróżnia się konstrukcji nowej od starej, gdyż przy ustalaniu wartości współczynnika λ_{DU} bierze się pod uwagę tylko grubość otuliny z betonu niezobojętniałego.

Tablica 8

Współczynniki λ_{DU} w przypadku mostów betonowych

Otulina d [cm]	Środowisko S		
	przemysłowe P	miejskie M	wiejskie W
0,5	7,160	1,5922	1,446
1,0	3,3985	1,3298	1,0702
2,0	1,6132	1,1110	1,0006
3,0	1,0432	1,0000	0,9621
4,0	0,7658	0,9279	0,9356
5,0	0,6023	0,8756	0,9156
10,0	0,2858	0,7312	0,8560

Należy zauważyć, że w przypadku wyznaczania współczynnika λ_{DU} rozróżniono trzy klasy środowiska (tabl. 8 i 9), a w przypadku współczynnika λ_{DS} – pięć kategorii środowiskowych (por. tabl. 6).

Aby określić współczynniki określające stan techniczny systemu odwodnienia, izolacji i urządzeń dylatacyjnych, tj. odpowiednio λ_{DSO} , λ_{DIZ} , λ_{DUD} , należy powiązać je ze skalą ocen

przyjętych w przypadku systemu przeglądów drogowych obiektów mostowych, czyli od 0 do 5, a następnie przyjąć wartości podane w tabl. 10.

Tablica 9

Wartość współczynnika λ_{DU}

Rodzaj ochrony	Wartości współczynnika λ_{DU} w środowisku		
	przemysłowym P	miejskim M	wiejskim W
Cynkowanie C	0,962	0,927	0,983
Kadmowanie K	1,000	0,963	0,927
Malowanie M	1,041	1,000	0,962
Bez ochrony O	7,160	1,593	1,145

Tablica 10

Wartości współczynników λ_{DSO} , λ_{DIZ} , λ_{DUD} w zależności od oceny stanu technicznego elementów wyposażenia

Ocena stanu technicznego	Wartości współczynników λ_{DSO} , λ_{DIZ} , λ_{DUD} por. wzór [1]
0	1,111
1	1,064
2	1,042
3	1,020
4	1,010
5	1,000

Po przyjęciu wartości trwałości wyjściowej i obliczeniu wszystkich współczynników określających kategorie trwałościowe, można trwałość mostu obliczyć ze wzoru

$$T = \frac{T_0}{\lambda_B \lambda_C \lambda_D} \quad (2)$$

Poniżej przedstawiono trzy przykłady zastosowania opisaną wyżej procedurę do obliczenia trwałości mostów.

Przykłady

Niżej zamieszczono trzy przykłady zastosowań przedstawionej metody:

– przykład 1. (rys. 1): most stalowy przez Wisłę w Nagnajowie z pomostem zespolonym, klasa objętości obciążenia 2 – KV2, oddany do eksploatacji w 1962 r. na drodze krajowej S, GP;



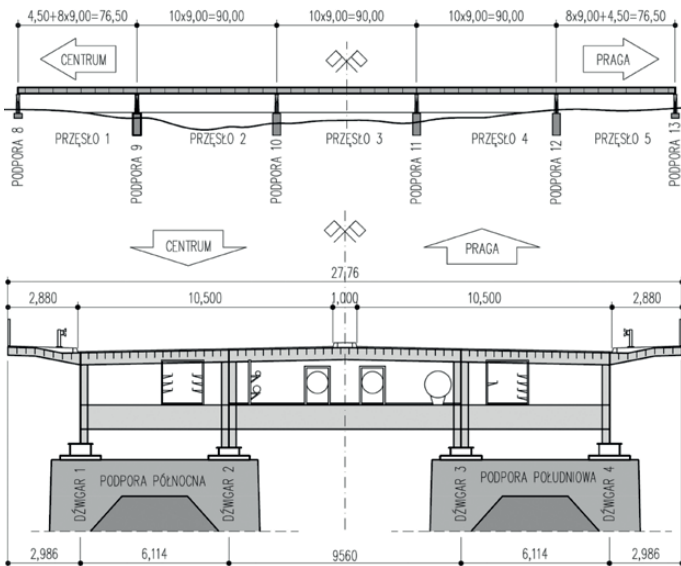
Rys. 1. Most przez Wisłę w Nagnajowie

– przykład 2. (rys. 2): most stalowy przez Wisłę w Puławach z pomostem zespolonym, klasa objętości obciążenia 2 – KV2, oddany do eksploatacji w 2008 r. na drodze krajowej S, GP;

– przykład 3. (rys. 3): most stalowy przez Wisłę w Warszawie – most Łazienkowski z pomostem ortotropowym, oddany do eksploatacji w 1974 r., zniszczony wskutek pożaru 14 lutego 2015 r., na drodze powiatowej – w praktyce autostradzie miejskiej.



Rys. 2. Most przez Wisłę w Puławach



Rys. 3. Most Łazienkowski w Warszawie

Mosty zaliczono do kategorii materiałowej A, kategorii konstrukcyjnej B, kategorii obciążeniowej C i kategorii utrzymano-środowiskowej D. Przyjęte do obliczeń wartości parametrów oraz wyniki obliczeń zestawiono w tabl. 11.

Podsumowanie i wnioski

Trwałość mostu określa się najczęściej przy poziomie ufności równym 95% (jak w przykładach powyżej). Odpowiada to poziomowi ufności przy wykonywaniu analizy statyczno-wytrzymałościowej, ale już nie zawsze przy określaniu warunków pracy konstrukcji. W niektórych krajach przyjmuje się mniejsze wartości poziomu ufności np. 90%, a nawet 50%.

Często rezultaty analizy określającej trwałość poszczególnych elementów konstrukcji są nieco szokujące, bo wynika z nich, że w zasadzie okres użytkowania obiektu dobiega końca. Takie wrażenie można odnieść wtedy, gdy zapomina się o definicji trwałości jako okresu bezawaryjnej eksploatacji,

Tablica 11

Zestawienie wartości parametrów oraz wyników obliczeń trwałości trzech mostów stalowych

Parametry	Most w Nagnajowie	Most w Puławach	Most Łazienkowski
Trwałość wyjściowa, lata	30	120	40
Współczynnik λ_B	1,000	1,000	1,000
Współczynnik λ_C	1,71	1,71	1,96
Współczynnik wpływu środowiska korozyjnego λ_{DS}	1,01 (wiejskie C1)	1,02 (przemysłowe P)	1,02 (miejskie C2)
Współczynnik wpływu jakości utrzymania λ_{DU}	0,962 (malowanie M)	1,041 (malowanie M)	1,031 (malowanie M)
Współczynnik wpływu stanu urządzeń dylatacyjnych λ_{DUD}	1,000 (szczelne)	1,000 (szczelne)	1,01 (ocena 4)
Współczynnik wpływu stanu izolacji λ_{DIZ}	1,000 (trwała i szczelna)	1,000 (trwała i szczelna)	1,010 (ocena 4)
Współczynnik wpływu stanu systemu odwodnienia λ_{DSO}	1,000 (działa prawidłowo)	1,000 (działa prawidłowo)	1,042 (działa nieprawidłowo – ocena 2)
Współczynnik λ_D – wzór (1)	0,972	1,062	1,118
Trwałość mostu, T, lat – wzór (2)	18	66,1	16,6

w którym nie wykonuje się robót wykraczających ponad przyjęte standardy utrzymaniowe. Doświadczenie i praktyka pokazują, że po wyczerpaniu trwałości elementy konstrukcji nie ulegają zniszczeniu i nie trzeba będzie ich natychmiast wymieniać. Oznacza to, że po upływie tego okresu należy wzmoc kontrolę najbardziej zużytych elementów.

Wartości liczbowe określające trwałość oznaczają, że po jej wyczerpaniu, przy poziomie ufności 95%, więcej niż w 5% elementów konstrukcyjnych mostu mogą pojawić się uszkodzenia, np. pęknięcia spoin, nitów czy śrub sprężających i zarysowania płyty betonowej. Oznacza to, że dopiero wtedy trzeba zacząć wykonywać prace niemieszczące się w standardach utrzymaniowych.

Zagadnieniem kluczowym wiarygodności obliczeń trwałościowych jest powiązanie systemu ocen stanu technicznego mostów z odpowiednimi kategoriami trwałościowymi [2, 19÷21].

Analiza zawartości protokołów okresowej kontroli (tabl. 12) pozwala stwierdzić, że z punktu widzenia obliczeń trwałościowych w przypadku kategorii A, B i C są istotne tylko dane zawarte w pozycjach 9, 10 i 16. Ewentualnie można brać pod uwagę także pozycje 11, 13, 14 i 17, a także 19 i 20, ale wymaga to bardziej szczegółowych analiz.

Z kolei w przypadku kategorii trwałościowej D są istotne pozycje 3, 4, 6, 7, 8 i 12. Wydaje się również, że jest uprawnione pominięcie w obliczeniach trwałościowych punktów 1, 2, 5, 15, 18 i 21.

Analiza trwałościowa obiektów mostowych przeprowadzona według zaprezentowanego algorytmu umożliwia określenie ich trwałości w zależności od materiału, z jakiego zostały wykonane, od rodzaju konstrukcji, od objętości obciążenia, jakie przejął most w ciągu swojego „życia”, a także od warunków eksploatacji i utrzymania.

Obecnie wartości stosowanych w analizie współczynników mają w większości charakter arbitralny. Aby zwiększyć wiarygodność algorytmu, jest konieczne zrealizowanie dwóch przedsięwzięć. Po pierwsze należy opracować dane uzyskiwane w wykonywanych co 5 lat (od 1965 roku) pomiarach natężenia ruchu na drogach krajowych i wojewódzkich oraz w niektórych miastach w taki sposób, aby sporządzić mapę sumarycznych nacisków na konstrukcję (tzw. objętości obciążenia

i widma obciążeń). Po drugie trzeba sporządzić krzywe degradacji poszczególnych elementów konstrukcji i wyposażenia mostów, a także obiektów jako całości, tak aby wartości współczynników opisujących kategorie trwałościowe przestały mieć

charakter arbitralny, a bazowały na danych rzeczywistych (ocenach) uzyskiwanych w ramach przeprowadzanych okresowych przeglądów obiektów mostowych. Obecnie znajdują się one częściowo tylko w postaci pisanej w księgach obiektów mostowych, natomiast powinny się znaleźć w odpowiednich modułach Systemu Gospodarki Mostowej, czyli powinny przybrać postać numeryczną.

Po zrealizowaniu obu wymienionych przedsięwzięć kategorie trwałościowe zostałyby skorelowane z ocenami stanu technicznego mostów. Niestety, liczebność tych danych jest ciągle niewystarczająca ze statystycznego punktu widzenia, w najlepszym bowiem przypadku sięgają roku 1991, a najczęściej obejmują ostatnie 5 lat. Minimalny okres, od którego można traktować dane jako wiarygodne, wynosi 30 lat.

Opisane wyżej prace powinny prowadzić systematycznie zarządcy obiektów mostowych, zarówno drogowych, jak i kolejowych.

Zobiektywizowanie podejścia do zagadnienia trwałości, czyli wprowadzenie porównywalności ocen między różnymi obiektami tego samego rodzaju i stworzenie praktycznego sposobu oceny trwałości istniejących i nowo projektowanych obiektów mostowych może w dłuższym czasie doprowadzić do znaczącej poprawy stanu technicznego mostów oraz do racjonalizacji wydatków na cele utrzymaniowe i remontowe.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Ahrens M.A., Mark P., Fust Ch.: Degradation history simulation – a tool for assessment of structural lifetime. Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization. Philadelphia, Pennsylvania USA. July 2010. IABMAS.
- [2] Bednarek M.: System Gospodarki Mostowej – XX-lecie funkcjonowania. „Drogownictwo”, nr 5/2015.
- [3] Bień J.: Trwałość konstrukcji jako kryterium zarządzania infrastrukturą mostową. Trwałość konstrukcji mostowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2012.
- [4] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. WKŁ. Warszawa 2010.
- [5] Borończyk-Płaska G., Radomski W.: Trwałość obiektów inżynierskich – wymagania formalne, teoria i praktyka. XVI konferencja „Współczesne metody wzmocnienia i przebudowy mostów”. Poznań – Rosnówko 2006.
- [6] Brandt A.: Trwałość obiektów inżynierskich a zrównoważony rozwój. „Drogi lądowe, powietrzne i wodne”, nr 10/2008.
- [7] Czerpak A., Czudek H., Pryga A., Wysokowski A.: Metoda szacowania wpływu korozji na nośność stalowych mostów drogowych. Wydawnictwo IBDiM i GDDKiA, Zmigród 2003.
- [8] Czudek H., Kaszyński A., Wysokowski A., Żurawicka A.: Degradacja stalowych mostów drogowych w Polsce na bazie wybranej grupy mostów. XVI seminarium „Współczesne metody wzmocnienia i przebudowy mostów”. Poznań – Rosnówko. Czerwiec 2006.
- [9] Czudek H., Wysokowski A.: Trwałość mostów drogowych. WKŁ, Warszawa 2005.
- [10] Ryżyński A.: Trwałość techniczna i użytkowa mostów drogowych oraz jej prognozowanie. „Drogownictwo”, nr 7-8/2005.
- [11] Wasiutyński Z.: O analizie efektów użytkowania i nakładów w mostownictwie. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1964.
- [12] Wysokowski A.: Zmęczenie i korozja – wyznaczniki trwałości eksploatacyjnej mostu. „Drogi lądowe, powietrzne i wodne”, nr 1/2009.

Tablica 12

Protokół okresowej kontroli rocznej i pięcioletniej obiektu mostowego – przeglądu podstawowego / rozszerzonego

Dane identyfikacyjne obiektu										
1	Numer ewidencyjny (JNI):	5	JAD:							
2	Nr drogi:	6	Najbliższa miejscowość:							
3	Kilometraż:	7	Rodzaj i nazwa przeszkody:							
4	Materiał konstrukcji dźwigarów:	8	Długość obiektu:							
STAN TECHNICZNY OBIEKTU					EKSPERTYZA					
Lp.	Element	Kod rodzaju uszkodzenia					Ocena stanu	Potrzeba wykonania	Tryb wykonania	
1	Nasypy i skarpy									
2	Dojazdy w obrębie skrzydeł									
3	Nawierzchnia jezdni									
4	Nawierzchnia chodników, krawężniki									
5	Balustrady, bariery ochronne, osłony									
6	Belki podporęczowe, gzymsy									
7	Urządzenia odwadniające									
8	Izolacja pomostu									
9	Konstrukcja pomostu									
10	Konstrukcja dźwigarów głównych									
11	Łożyska									
12	Urządzenia dylatacyjne									
13	Przyczółki									
14	Filary									
15	Koryto rzeki, przestrzeń podmostowa									
16	Przeguby									
17	Konstrukcje oporowe, skrzydełka									
18	Urządzenia ochrony środowiska									
19	Zakotwienia cięgien									
20	Cięgna									
21	Urządzenia obce									
Stan pogody:		Ocena średnia obiektu:								
Temperatura:		OCENA CAŁEGO OBIEKTU:								
Uszkodzenia zagrażające bezpieczeństwu ruchu publicznego (opis uszkodzeń):										
Uszkodzenia grożące katastrofą budowlaną (opis uszkodzeń):										
PRZYDATNOŚĆ OBIEKTU DO UŻYTKOWANIA										
Parametr					Ograniczenie			Ocena		
1. Bezpieczeństwo ruchu publicznego										
2. Aktualna nośność obiektu										
3. Dopuszczalna prędkość ruchu pojazdów										
4. Szerokość skrajni na obiekcie										
5. Wysokość skrajni na obiekcie										
6. Skrajnia/światło pod obiektem										
ESTETYKA OBIEKTU I JEGO OTOCZENIA (opis):										
WYKONANIE ZALECEŃ Z POPRZEDNIEGO PRZEGLĄDU:										