

## VPLYV IDEALIZOVANIA PRIEBEHU TLAKOVEJ VLNY NA BEZPEČNOSŤ POSÚDENIA OBJEKTU

Lucia Figuli<sup>1</sup>, Vladimír Kavický<sup>2\*)</sup>

### ABSTRAKT

Príspevok predstavuje vplyv idealizácie priebehu tlakovej vlny na dynamickú analýzu konštrukcie. Tlaková vlna vzniká pri explózii nástražného výbušného systému. Tvar tlakovej vlny je idealizovaný tromi základnými funkciami – lineárnou, exponenciálnou a exponenciálnou s uvažovaním zápornej fázy. Tvary tlakovej vlny sú porovnané s reálnym priebehom získaným z experimentu.

### Kľúčové slová:

tlaková vlna, dynamický súčiniteľ, dynamická analýza, idealizovanie priebehu tlakovej vlny

### ABSTRACT

The paper presents the influence of blast wave idealisation on dynamical analysis of structure. Such blast wave is created by detonation of improvised explosive device. The shape of blast pressure wave is idealised by three basic shapes – with linear decay time profile, exponential decay time profile, and exponential decay time profile considering negative phase. These idealized profiles are compared with the pressure time history obtained in tests.

### Kľúčové slová:

tlaková vlna, dynamický súčiniteľ, dynamická analýza, idealizovanie priebehu tlakovej vlny

## 1 ÚVOD

Terorizmus a zneužívanie výbušnín na jeho účely nie je z hľadiska globálnej aj regionálnej bezpečnosti novodobým problémom, ale je trvalou hoci negatívnou súčasťou novodobých dejín. Útoky s použitím výbušnín nie sú špecifickou metódou

<sup>1</sup>\*Ing. Lucia, Figuli, PhD, Žilinská univerzita, Fakulta špeciálneho inžinierstva, 041/5136615, [lucia.figuli@gmail.com](mailto:lucia.figuli@gmail.com)

<sup>2</sup> Ing. Vladimír, Kavický, Žilinská univerzita, Fakulta špeciálneho inžinierstva, [kavicky@gmail.com](mailto:kavicky@gmail.com)

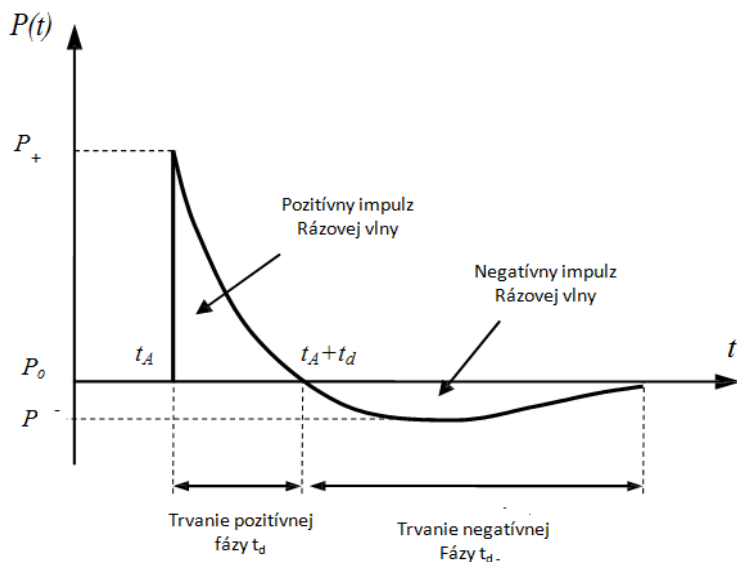
jednej skupiny teroristov, ale využívajú ho rovnako náboženský fundamentalisti ako separatisti alebo pravicoví či lavicoví radikáli. Výbušniny používajú aj osamelí jednotlivci tzv. "LONE WOLF". Bombové atentáty na infraštruktúru sú aj jednou z hlavných metód boja polovojenských skupín v rizikových oblastiach ako je Irak, Afganistan, Pakistan alebo Sýria.

V oblastiach vojenských konfliktov je ochrana infraštruktúry zabezpečená pomocou vojenských metód t.j. betónové zásteny, HESCO systémy, DEFENCELL systémy alebo systémy gabionov a valov. Problematickou oblasťou bezpečnostného manažmentu sa stáva skutočnosť, že sa teroristické činy s použitím výbušnín v posledných rokoch presunuli z svetových bojísk do centier veľkých miest. Len pre príklad spomenieme bombové útoky v New Yorku, Madride, Londýne, Osle, Burgase, Minsku, Moskve alebo Bostone. V takýchto priestoroch nie je možné voliť vojenské metódy ochrany objektov a je preto potrebné zaoberať sa inými možnými riešeniami. Vďaka technologickému pokroku sa vyvinuli čiastkové stavebné materiály ktoré zvyšujú odolnosť objektov a prijali sa čiastkové systémové opatrenia ako napr. systémy zábran pre vjazdy vozidiel, zákazy vjazdov nákladných a dodávkových vozidiel, alebo stavebné materiály. Medzi tie je možné zaradiť polyuretánové omietky, moderné okná, ktoré vydržia pretlaky na úrovni stoviek kPa. Čiastkového pokroku v oblasti bezpečnosti sa vďaka technologickému pokroku dosiahlo. Je však potrebné sa zamerať na celkovú analýzu odozvy konštrukcie zaťaženej tlakovou vlnou ako celku. Je totižto častým riešením, že napríklad na zvýšenie ochrany sa zvýši odolnosť okien, ale nezmení sa odolnosť základnej stavebnej konštrukcie. t.j. okná by pretlak vydržali, ale stena by výbuchu neodolala. Problém zaťaženia konštrukcie sa riešil už v 50- 60tych rokoch minulého storočia. V dostupných analýzach takto zaťažených konštrukcií sa reálny priebeh tlakovej vlny výrazne zjednodušoval na tlakovú vlnu s lineárnym priebehom čo nekorešponduje s realitou. V nasledujúcom článku chceme, poukázať na to, aký má rôzne zjednodušovanie tvaru priebehu tlakovej vlny vplyv na dynamickú analýzu konštrukcie.

## **2 TLAKOVÁ VLNA**

### **2.1 PRIEBEH TLAKOVEJ VLNY**

V prípade iniciovania nástražného výbušného systému, dochádza k veľmi silnej exotermickej reakcii. V priebehu reakcie dochádza k premene tuhej či tekutej zložky výbušniny na vysokotlakový plyn. Produkty vznikajúce pri explózii sa rozširujú do okolia pod vysokým tlakom a snažia sa nájsť rovnováhu s okolitým prostredím, čo má za následok vznik rázovej vlny. Tá je charakterizovaná zmenou tlaku, hustoty a teploty na jej priečelí. Priebeh rázovej vlny je charakterizovaný prudkým nárastom tlaku na začiatku jej priebehu. Po dosiahnutí maximálnej hodnoty nastáva fáza poklesu, ktorá pokračuje až do zápornej fázy, kedy vzniká na veľmi krátke obdobie vákuum, čo má za následok vťahovanie pár a vzduchu z prostredia smerom k epicentru výbuchu. Po vyrovnaní síl dochádza k nástupu kladnej časti rázovej vlny ktorá, už však nemá také maximálne hodnoty ako prvý zaznamenaný impulz. Celý priebeh sa vytvára vo veľmi krátkych časových intervaloch, rádovo v stotínach sekundy [1].



$P_0$  - začiatočná ( nulová )  
 hodnota tlaku rázovej vlny ( tlak  
 okolia )  
 $P_+$  - maximálna hodnota tlaku (   
 tzv. pretlak ) vyvolaný výbuchom  
 $P_-$  - minimálna hodnota tlaku (   
 tzv. podtlak - záporná časť )  
 vyvolaná výbuchom  
 $t_A$  - čas nástupu rázovej vlny  
 $t_d$  - čas trvania rázovej vlny

Obrázok 1 Priebeh a fázy tlakovej vlny

V priebehu rázovej vlny rozoznávame dve fázy – pozitívnu a negatívnu. Veľkosť tlaku negatívnej fázy je oveľa menší ako v predchádzajúcej pozitívnej časti.

## 2.2 IDEALIZÁCIA PRIEBEHU TLAKOVEJ VLNY

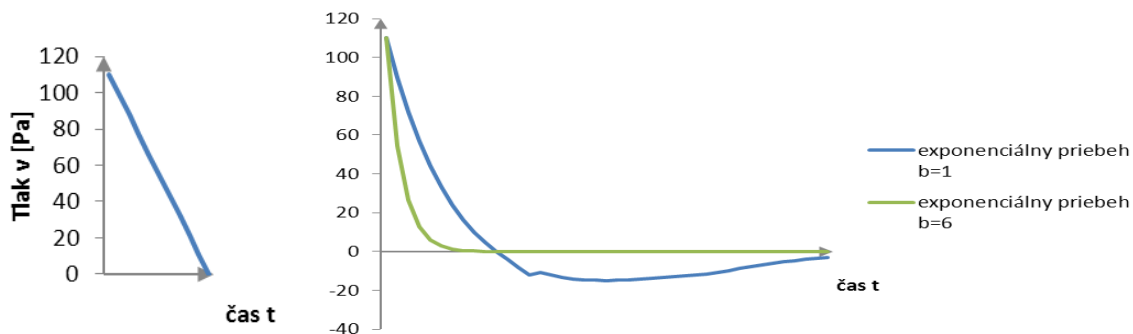
Najrozšírenejšie používané zjednodušenie priebehu tlakovej vlny, je jeho popísanie lineárnou funkciou (1), t.j. zjednodušenie na trojuholníkový priebeh, kde sa negatívny impulz rázovej vlny zanedbáva. Tlak z maximálnej hodnoty  $P_s$  sa mení v čase od nula po hodnotu  $t_d$ , kde je tlak nulový.

$$P(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) & t < t_d \\ 0 & t > t_d \end{cases} \quad (1)$$

Predchádzajúci prístup je veľmi zjednodušený, ale používa sa vo všetkých platných technických predpisoch a odporúčaní. Reálny priebeh tlakovej vlny môže byť popísaný výstižnejšie použitím exponenciálnej funkcie, v ktorá v sebe zahrňuje aj negatívnu fázu. Priebeh má začiatočný maximálny tlak  $P_s$  a je popísaný rovnicou

$$P(t) = P_s \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-bt/t_d} \quad (2)$$

Parameter  $b$  je rozhodujúci pre negatívnu fázu exponenciálneho priebehu. Ak  $b$  je menšie ako jedna, v priebehu tlakovej vlny je veľmi veľká, významná negatívna fáza. So zväčšovaním parametra  $b$  sa negatívna fáza zmenšuje. Na obr. 2 je vidieť porovnanie tvaru priebehu tlakovej vlny použitím parametru tvaru  $b=1$  a  $b=6$ .

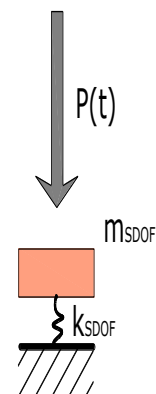


Obrázok 2 Zjednodušenie priebehu tlakovej vlny a) lineárnou funkciou b) exponenciálnou funkciou

## 2 ANALÝZA ODOZVY KONŠTRUKCIE

### 2.1 DYNAMICKÝ SÚČINITEĽ

Najjednoduchším spôsobom stanovenia dynamickej odozvy konštrukcie na namáhanie tlakom od výbuchu je jej pretransformovanie na systém s jedným stupňom voľnosti (SDOF). Reálna konštrukcia je nahradená ekvivalentným systémom hmoty a jednou pružinou, ktorá predstavuje odpor konštrukcie voči deformácii. Takáto hmota sa môže pohybovať len jedným smerom. Na popísanie správania sa takéhoto systému s jedným stupňom voľnosti uvažujeme s netlmeným kmitaním konštrukcie, pretože maximálna odozva konštrukcie obyčajne nastáva v prvom cykle kmitania, kedy tlmenie je minimálne. Zjednodušenie konštrukcie na sústavu s jedným stupňom voľnosti, je v tom, že sa dajú použiť vzore pre riešenie konštrukcií zaťažených staticky.



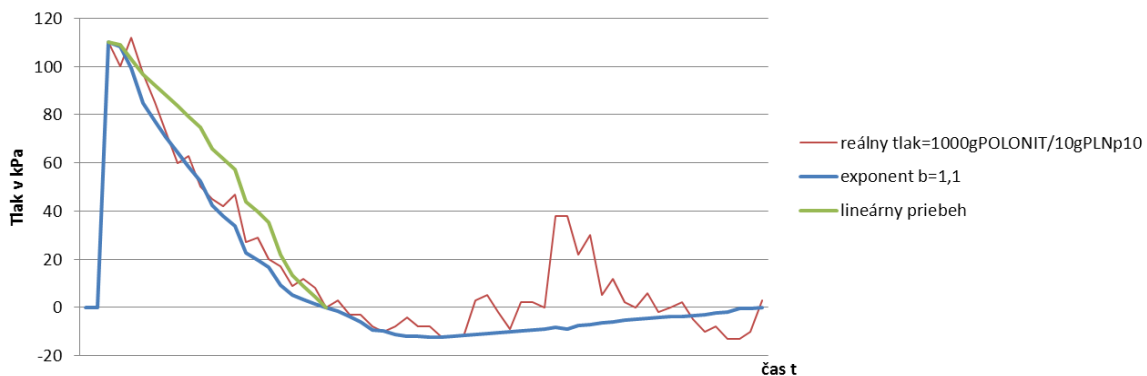
Obrázok 3 Systém s jedným stupňom voľnosti

Je potrebné len do vzorcov dosadiť vlastnú kruhovú frekvenciu (periódu) toho vlastného tvaru kmitania, ktorý sa najviac blíži tvaru deformácie od dynamického zaťaženia, tak aby sme určili hodnotu dynamického súčiniteľa  $\delta$  (anglicky DFL – Dynamic Load Factor), pomocou ktorého sa dynamická úloha prevedie na statickú. Pre lineárne pružné konštrukcie dynamický súčiniteľ definujeme ako pomer maximálnej výchylky pri dynamickom zaťažení ku výchylke od statického zaťaženia.

$$\delta = v_{max}/v_{stat} \quad (3)$$

V nasledujúcej časti príspevku porovnáme vplyv zjednodušenia reálne nameranej tlakovej vlny (lineárny a exponenciálny priebeh) vid' obrázok 4, na stanovenie dynamického súčiniteľa. Tlaková vlna bola zaznamenaná v experimente. Experiment bol zameraný na meranie tlaku rázovej vlny v závislosti od vzdialenosti epicentra explózie. Uvedený priebeh tlakovej vlny bol zaznamenaný pri skúške zo dňa 12.6.2012 v skúšobnom laboratóriu Vojenského technického a skúšobného ústavu Záhorie. Snímač priebehu tlakovej vlny bol umiestnený vo vzdialenosti 2m od epicentra výbuchu. Jednalo sa o 1000g nálož Polonitu s pridaním 10gPLNp10. Výbuchové teplo uvádza výrobca 5138 kJ/kg. Priemyselná výbušnina bola zvolená

preto, aby sme čo najviac priblížili realnosť používaných výbušnín. Údaje spojeneckého veliteľstva pre transformáciu NATO v americkom Norfolku uvádzajú, že až 95 % všetkých výbuchov je spôsobených podomácky vyrobenými ANFO trhavinami.



Obrázok 4 Reálny priebeh tlakovej vlny a jej aproximácia

Pre porovnanie budeme uvažovať s nosníkmi z rôzneho materiálu, ktoré sa líšia hustotou použitého materiálu a teda kmitajúcou hmotou, vid' tabuľku č.1. Pre systém s jedným stupňom voľnosti boli napísané rovnice pohybu systému (3), pre lineárne a exponenciálne zaťaženie.

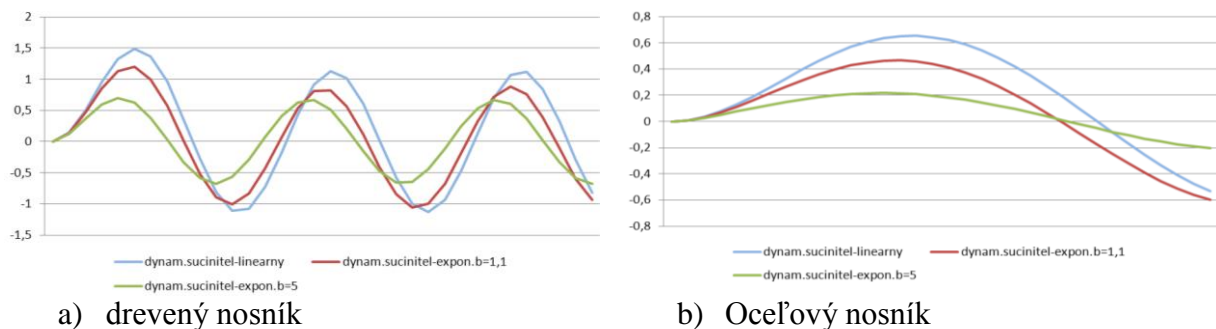
$$m\ddot{v}(t) + kv(t) = P(t) \tag{4}$$

Riešenie diferenciálnych rovníc pre lineárne zaťaženie je uvedené v [2] a riešenie diferenciálnych rovníc pre exponenciálny priebeh zaťaženia je uvedené v [3]. Nosníky majú dĺžku 2 m a zo statického hľadiska sa jedná o nosník jednoducho podporený. Ekvivalentná hmotu bola počítaná uvažovaním Load mass factor podľa [2] pre jednoducho podporený nosník (KLM=0,78).

Tabuľka 1 Prehľad hustoty jednotlivých materiálov

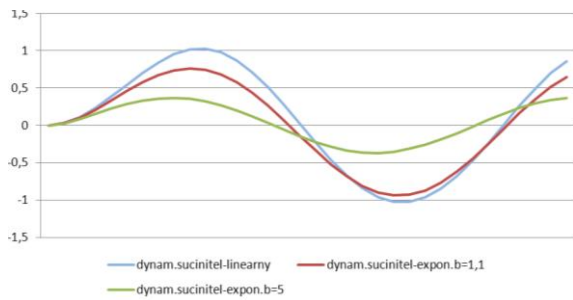
Por. číslo	materiál	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
1.	Borovicové drevo	500
2.	Oceľ	7850
3.	železobetón	2500
4.	Hliník	2700

Výsledné hodnoty dynamického súčiniteľa stanovené z dynamickej analýzy konštrukcie sú pre nosník z rôznych typov materiálu uvedené na obrázku č.5.

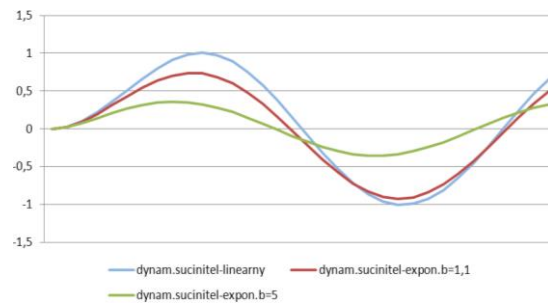


a) drevený nosník

b) Oceľový nosník



c) železobetónový nosník



d) hliníkový nosník

Obrázok 5 Hodnoty dynamického súčiniteľa v závislosti od typu materiálu nosníka

Tabuľka 2 Hodnoty dynamického súčiniteľa

Por. číslo	Nosník materiál	Dynamický súčiniteľ						
		Trojuhol. priebch	Exponen. priebch b=1,1	rozdiel	Rozdiel v [%]	Exponen. priebch b=5	rozdiel	Rozdiel v [%]
1.	Borovicové drevo	1,49	1,20	0,29	19,56	0,70	0,5	41,67
2.	Oceľ	0,65	0,60	0,05	7,69	0,27	0,55	91,67
3.	Železobetón	1,03	0,94	0,09	8,74	0,37	0,57	60,64
4.	Hliník	1,02	0,93	0,09	8,8	0,36	0,57	61,29

### 3 ZÁVER

Z uvedených prezentovaných výsledkov vyplýva, že dlhodobo používaný prístup idealizácie priebehu tlakovej vlny na lineárny trojuholníkový priebeh, keď uvažujeme len s kladnou fázou je konzervatívny, ale z hľadiska návrhu konštrukcie na strane bezpečnosti. Pri nosníku z dreva je rozdiel približne 20%, t.j., že z hľadiska návrhu konštrukcie pri zaťažení tlakovou vlnou sa hodnoty odozvy konštrukcie pri statickej analýze navýšia o 20%. Pri zahrnutí do výpočtu len kladnej fázy, ale s exponenciálnym priebehom, t.j. parameter  $b=5$ , dosahovali rozdiely v dynamickom súčiniteli napr. pri oceľovom nosníku až 90%. Z toho vyplýva, že pri návrhu konštrukcie s exponenciálnym priebehom, ale neuvažovaním zápornej fázy sú hodnoty výrazne menšie a teda dostaneme nebezpečnejší návrh, ako pri uvažovaní s čo približne najreálnejším priebehom tlakovej vlny, kedy parameter  $b=1,1$ .

### POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] JANGL. Š. – KAVICKÝ, V. : Ochrana pred účinkami výbuchov výbušnín a nástražných výbušných systémov. Žilina 2012 ISBN -978-80-971108-0-2 str. 93 a 94
- [2] BIGGS, J.M.: Introduction to Structural Dynamics, 1964 ISBN 07-005255-7.
- [3] GANTES, CH.J. – PNEVMATIKOS, N.G: Elastic-plastic response spectra for exponential blast loading, Internal Journal of Impact Engineering 2003

Článok recenzovali dvaja nezávislí recenzenti.