

Stanisław Sieluk<sup>1)</sup>

„STATIC” s. c. Usługi Inżynierskie

# Krajowe a europejskie wytyczne wymiarowania konstrukcji regałów (Cz. 1) w aspekcie bezpieczeństwa ich użytkowania

Artykuł Ceesa J. Tilburgsa pt. „Regały dla poprawnie eksploatowanych wózków” – cz. 1 – Logistyka nr 1/2001, cz. 2 – Logistyka nr 4/2001 [1] porusza bardzo istotne kwestie dotyczące metod zwiększenia bezpieczeństwa w magazynach z punktu widzenia eksploatacji zainstalowanych w nich regałów. Skoncentrowano się w nim głównie na zagadnieniu doboru stosowanych w obliczeniach statycznych właściwych współczynników bezpieczeństwa i wartościach obciążeń dodatkowych oraz na ochronie mechanicznej elementów narażonych na uderzenia wózkami lub jednostką ładunkową. Autor prowadzi również dyskusję na temat potrzeby zastosowania w obliczeniach dodatkowego współczynnika bezpieczeństwa, uwzględniającego stopień intensywności eksploatacji magazynu.

W wyżej wymienionym artykule przedstawiono tabelę, z której wynika, że w Polsce stosuje się jeden z najniższych współczynników bezpieczeństwa, co pozostawione bez komentarza, może dawać podstawy do wyciągania pochopnych wniosków dotyczących tego zagadnienia.

Artykuł prowokuje zatem do podjęcia dyskusji na temat wpływu stosowanych do obliczeń przepisów na nośność obliczeniową regałów.

Krajowe przepisy dotyczące obliczeń regałów (zalecenia określone w dokumencie technicznym Instytutu Logistyki i Magazynowania IL-B-001), opierają się głównie na normie PN-90/B-03200. Dla niej obowiązują

trzy podstawowe współczynniki:

$\gamma_s$  – współczynnik materiałowy (dla St3S  $\gamma_s = 1,15$ )

$\gamma_f$  – współczynnik obciążenia (dla stanów granicznych użytkowania  $\gamma_f = 1,2$ )

$\beta$  – współczynnik dynamiczny ( $\beta = 1,5$  – według normy PN-82/B-02003 pośrednio związanej z PN-90/B-03200).

Natomiast dla szeroko stosowanych w Europie przepisów – FEM 10.2.02, wartości tych współczynników to:

$\gamma_M = 1,1$  – współczynnik materiałowy

$\gamma_f = 1,4$  – współczynnik obciążenia

$\beta = 1,25$  – współczynnik dynamiczny<sup>2)</sup>.

Dla różnych przepisów, dla różnych elementów konstrukcyjnych i dla sprawdzania ich nośności na podstawie różnych kryteriów, wpływ poszczególnych współczynników na wynik jest różny.

Dla przykładu, przy sprawdzaniu stateczności słupa regału według przepisów FEM, iloczyn współczynników  $\gamma_M \cdot \gamma_f$  można traktować jako łączny współczynnik bezpieczeństwa. Natomiast w przypadku PN-90/B-03200, w związku z niebezpośrednim wpływem współczynnika materiałowego na nośność oblicze-

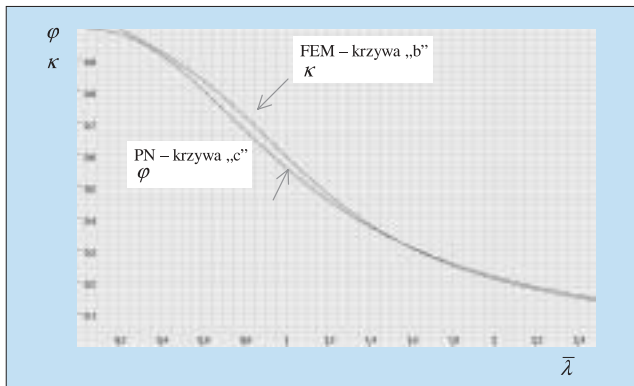
niową słupa, mnożenia takiego wykonać nie wolno. Okazuje się bowiem, że współczynnik ten obniża nośność nie o 15% (jakby się to mogło wydawać) a o 2 – 5% (wpływ wartości współczynnika dynamicznego, o którym we wspomnianym artykule autor nie mówi, w tym przypadku jest funkcją malejącą, dążącą do jedności, zależną od liczby jednostek ładunkowych znajdujących się w całej ko-

**Tab. 1.** Porównanie obliczeń stateczności słupa kolumny regału zgodnie z PN-90/B-03200 i FEM 10.2.02  
Źródło: opracowanie własne

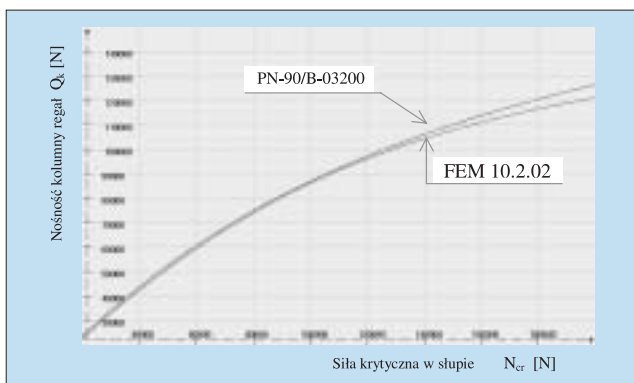
Wielkość	PN – 90/B – 03200	FEM 10.2.02
Warunek stateczności słupa	$\frac{N}{\varphi \cdot N_{RC}} \leq 1$	$\frac{N_{b,Rd} \cdot \gamma_M}{\kappa \cdot N_{RC}}$
Obciążenie słupa	N	$N_{b,Rd}$
Współczynnik wyoboczeniowy	$\varphi$	$\kappa$
Wsp. redukcji nośności oblicz.	$\psi = 1$	-
Granica plastyczności	$R_{emin} = 235 \text{ Mpa}$	$f_y = 235 \text{ MPa}$
Współczynnik materiałowy	$\gamma_s = 1,15$	$\gamma_M = 1,1$
Wytrzymałość obliczeniowa	$f_d = \frac{R_{e, min}}{\gamma_s} = \frac{235}{1,15} = 212,5 \text{ MPa}$	-
Pole przekroju (brutto, efektywne)	$A_{br} = 570 \text{ mm}^2$	$A_{eff} = 550 \text{ mm}^2$
Nośność obliczeniowa przekroju przy ściskaniu	$N_{RC} = \psi \cdot A_{br} \cdot f_d = 122550 \text{ N}$	-
Siła krytyczna (z analizy komputerowej)	$N_{cr} = 43500 \text{ N}$	
Smukłość względna	$\bar{\lambda} = 1,15 \sqrt{\frac{N_{RC}}{N_{cr}}} = 1,93$	$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = 1,72$
Krzywa wyoboczeniowa	„c”	„b”
Współczynnik imperfekcji	$n = 1,2$	$\alpha = 0,34$
Współczynnik niestateczności ogólnej (wykres – Ryc. 1)	$\varphi = (1 + \bar{\lambda}^{2n})^{-1/n}$	$\kappa = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$ , gdzie $\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$
	$\varphi = 0,23$	$\kappa = 0,28$
Współczynnik obciążenia	$\gamma_f = 1,2$	$\gamma_f = 1,4$
Nośność kolumny regału	$Q_k = \frac{2N_{RC} \cdot \varphi}{\gamma_f} \cong 47000 \text{ N}$	$Q_k = \frac{2\kappa \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_M \cdot \gamma_f} \cong 47000 \text{ N}$

<sup>1)</sup> Autor jest byłym kierownikiem Zakładu Konstrukcji Urządzeń Magazynowych Instytutu Logistyki i Magazynowania, a obecnie właścicielem firmy „STATIC” s. c. USŁUGI INŻYNIERSKIE, specjalizującej się w przeprowadzaniu analiz nośności regałów zarówno nowo projektowanych, jak i już eksploatowanych, wymagających określenia nośności. (e-mail: statics@poczta.onet.pl) – red.

<sup>2)</sup> Z artykułu [1] wynika, że zdaniem jego autora żaden kraj współczynnika tego nie uwzględni.



Ryc. 1. Wykresy krzywych wybozeniowych dla PN-90/B-03200 i FEM 10.2.02. Źródło: opracowanie własne



Ryc. 2. Zależność nośności (stateczności) kolumny regału od siły krytycznej słupa dla  $A_{br} = 570 \text{ mm}^2$ ;  $A_{eff} = 550 \text{ mm}^2$  i dla stali St3S. Źródło: opracowanie własne

lumnie i przez to na ogół jest znikomy).

Z uwagi na powyższe, porównywanie iloczynów współczynników  $\gamma_{S/M}$  i  $\gamma_f$  przy omawianiu poszczególnych przepisów w aspekcie bezpieczeństwa konstrukcji, tym bardziej może dawać nieprawdziwy obraz, a co za tym idzie, może pojawić się opinia, iż regały analizowane na podstawie pol-

ściowo na normie EURUCOD3 opracowano do analizy regałów, których elementy, a w szczególności słupy wykonane są z kształtowników zimno giętych (profilowanych).

### Stateczność słupów przy osiowym ściskaniu

Podstawową różnicą między rozpatrywanymi przepisami (w zakresie analizy stateczności słupów) jest przypisanie profilowi słupa różnych krzywych wybozeniowych oraz zastosowanie innych wzorów określających smukłość względną  $\lambda$  i współczynnik niestateczności ogólnej  $\phi$  lub w przypadku FEM –  $\kappa$ ).

Wszystkie różnice w przebiegu wyznaczenia stateczności słupa oraz wynik w postaci nośności kolumny regału  $Q_k$  przedstawiono w tab. 1. Parametry słupa zaczerpnięto z konkretnego, ana-

lizowanego przez autora przypadku. Wpływ współczynnika dynamicznego pominięto, co w rozważaniach działa na niekorzyść PN.

Do obliczeń przyjęto:

- pole przekroju poprzecznego słupa
- gatunek stali (St3S)
- siłę krytyczną w słupie.

Siłę krytyczną określono na podstawie symulacji komputerowej wykonanej programem opartym na MES (metoda elementów skończonych), posiadającym moduł liniowej analizy stateczności.

Mimo znacznych różnic w obliczaniu nośności a szczególnie w wartościach częściowych współczynników bezpieczeństwa, wyniki są identyczne. Interesujące jest również to, iż krzywe wybozeniowe – krzywa „c” – dla ceowników walcowanych (według PN) i krzywa „b” – dla typowych, profilowanych na zimno kształtowników – szeroko stosowanych w budowie regałów (FEM), mają zbliżony przebieg (ryc. 1).

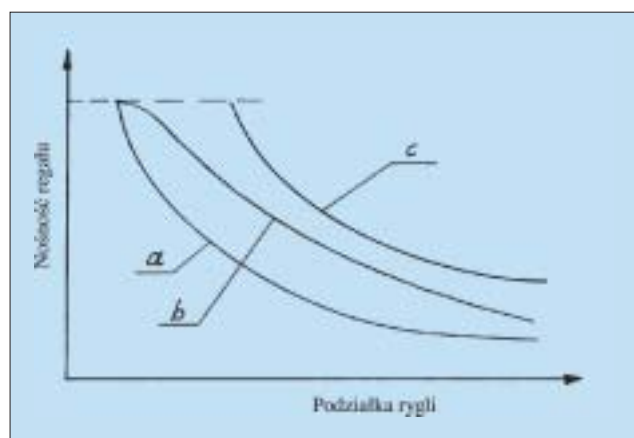
Dla wykazania, że w konkretnym przypadku konstrukcyjnym zbieżność wyników obowiązuje dla dowolnej siły krytycznej słupa (pośrednio dla różnych smukłości), sporządzono wykres zależności  $Q_k = f(N_{cr})$  dla PN i FEM (ryc. 2).

Widać, że w przypadku analizy stateczności, obawy uzyskiwania przy użyciu PN-90/B-03200 zawyżonych nośności (stateczności) są nieuzasadnione.

### Ściskanie osiowe słupa z jednoczesnym zginaniem

Zarówno polskie, jak i europejskie przepisy mówią, że konstrukcje wrażliwe na efekty II rzędu (do nich należą regały bez stężeń) należy obliczać według teorii II rzędu, przy czym jeśli wymiarowanie konstrukcji przeprowadza się na podstawie sił i momentów II rzędu z uwzględnieniem określonych właściwymi przepisami wstępnych przechyłów, to przy sprawdzaniu stateczności, słupy takich konstrukcji można traktować jako słupy o węzłach nieprzesuwnych ze współczynnikiem długości wybozeniowej  $\mu \leq 1$ .

Przepis ten sprawia, że nośność obliczeniowa regałów – określona na podstawie nośności słupa – wynika z warunku jego jednoczesnego ściskania i zginania. Wyjaśnia to ogólny wykres nośności regału (ryc. 3) jako



Ryc. 3. Krzywe nośności regału. Źródło: opracowanie własne  
a – warunek stateczności słupa o węzłach przesuwnych, b – warunek ściskania ze zginaniem słupa (siły i momenty II rzędu), c – warunek stateczności słupa o węzłach nieprzesuwnych.

zależność nośności od podziałki rygli (odległości pomiędzy poziomami składowania), gdzie parametrem jest warunek, według którego nośność ta jest określana.

Warunek ściskania z jednoczesnym zginaniem (krzywa „c”) składa się z kilku członów:

$$A + B + C \leq 1 - \Delta$$

gdzie człon A to lewa strona warunku ściskania słupa o węzłach nieprzesuwnych. Człon B i C to warunki zginania w prostokątach do siebie płaszczyznach (składnik  $\Delta$  to poprawka, przyjmująca zazwyczaj bardzo małą wartość). Z tego względu krzywa „b” zawsze leży pod krzywą „c”. Zatem skoro można pominąć krzywą „a”, jedynym warunkiem do sprawdzenia stateczności słupa jest warunek ściskania ze zginaniem – krzywa „b”. Postać utraty stateczności przedstawia ryc. 4. (a – dla węzłów przesuwnych, b – dla węzłów nieprzesuwnych).

Wobec powyższego, oprócz takich czynników jak:

- wielkość współczynników  $\gamma_s$ ,  $(\gamma_M)$ ,  $\gamma_f$
- sztywność konstrukcji, w tym zaczepów,
- bardzo istotnego znaczenia nabierają:
- zewnętrzne, poziome obciążenie dodatkowe
- wstępne, obliczeniowe pochylenie regału, szczególnie w jego wzdłużnym kierunku.

Pojawia się tu również wpływ współczynnika dynamicznego  $\beta$ . Spowodowane jest to tym, że w przypadku momentu w węźle połączenia słupa z ryglem, współczynnik ten rozkłada się na określoną liczbę jednostek ładunkowych nie w kolumnie, jak było w poprzednim przypadku, lecz w gnieździe.

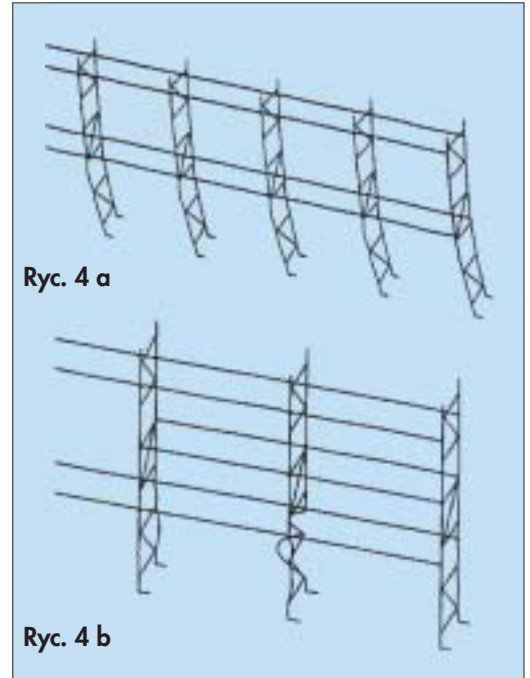
Mechanizm wpływu poszczególnych czynników na wielkości sił i momentów zarówno I jak i II rzędu, a zatem na stopień wyłączenia konstrukcji, pokazują schematy przedstawione na ryc. 5, a jego charakter na ryc. 6. Widać, że wpływ wielkości obciążenia regału, a pośrednio współczynnika obciążenia  $\gamma_f$ , jak i sztywności połączenia zaczepowego jest nieliniowy, a siły zewnętrznej i kąta początkowego pochylenia regału – w przybliżeniu liniowy.

Poszczególne wykresy na ryc. 5 przedstawiają mechanizm wpływu

na wielkość momentów I i II rzędu następujących czynników:

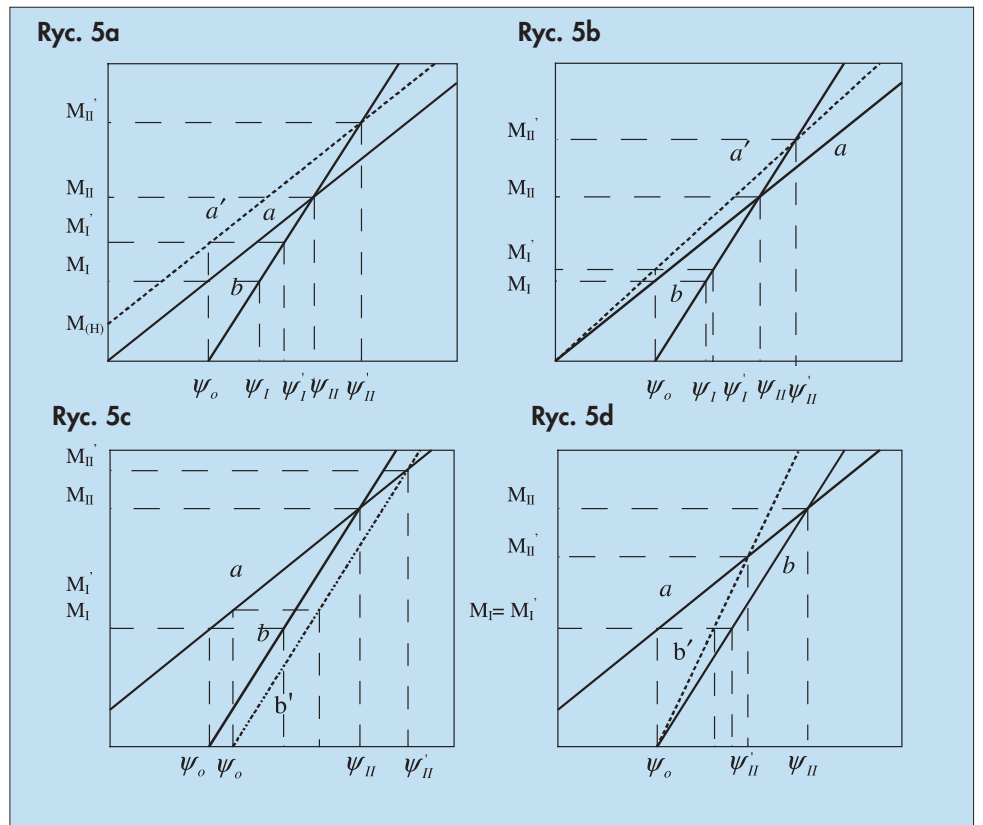
- a) zewnętrznego obciążenia dodatkowego
- b) obciążenia obliczeniowego (w tym i wielkość współczynnika obciążenia  $\gamma_f$ ,
- c) obliczeniowego kąta pochylenia regału
- d) sztywności konstrukcji (w tym sztywności zaczepu „k”).

Zewnętrzne obciążenie dodatkowe, przyłożone do górnego poziomu składowania działa szczególnie niekorzystnie na konstrukcję przy małej liczbie kolumn (do ok. 4), gdyż wówczas moment pochylający regał rozkłada się na małą liczbę elementów nośnych konstrukcji. Wymagania Instytutu Logistyki i Magazynowania (IL-B-001) w tej kwestii oparte zostały na niemieckich przepisach ZH 1/428, które dla regałów obsługiwanych mechanicznie, niezależnie od wysokości, proponują przyjmować siłę zewnętrzną  $H=350$  N. Przepisy FEM do wysokości ok. 4,7 m są bardziej ostrożne, a powyżej zaś bardziej optymistyczne (ryc. 7). Za uważa się w tej kwestii dużą rozbież-

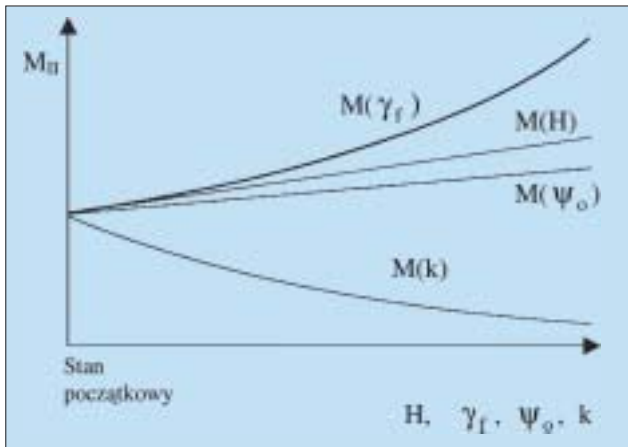


Ryc. 4. Postać utraty stateczności słupów regału a – o węzłach przesuwnych, b – o węzłach nieprzesuwnych

Źródło: „Sprawdzenie nośności gniazd regałów paletowych do składowania jednostek ładunkowych o parametrach.....” – Instytut Logistyki i Magazynowania, B6-10-Z28-0-2000. Autor: Stanisław Sieluk



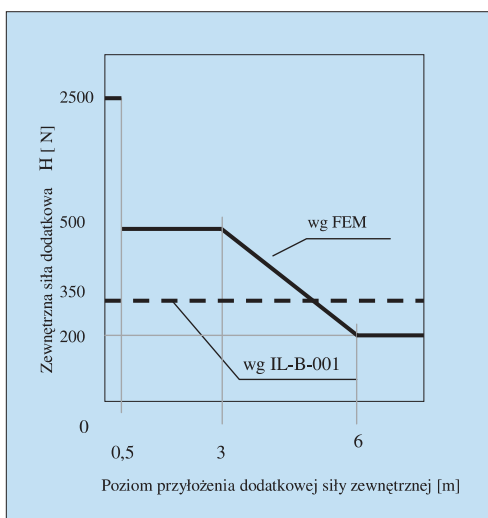
Ryc. 5. Mechanizm wpływu niektórych czynników na moment II rzędu jako miernik wyłączenia regału. Linia „a” – moment pochylający regał, „b” – moment sprężystości regału, znaczek „prim” oznacza – po zmianie, indeks I – kąt i moment I rzędu, indeks II – kąt i moment II rzędu. Źródło: opracowanie własne



Ryc. 6. Charakter wpływu niektórych czynników na momenty II rzędu w węzłach konstrukcji. Źródło: opracowanie własne

ność co do obciążenia dodatkowego przyłożonego na wysokości do 0,5 m, które nie ma istotnego wpływu na efekty II rzędu, ale poprzez wywołanie w dolnej partii słupa znacznych momentów gnących, ma stosunkowo duży wpływ na warunek stateczności przy ściskaniu ze zginaniem.

Zalecenia FEM przewidują tu obciążenie w kierunku prostopadłym do czoła regału  $H = 2500$  N, a w kierunku równoległym  $H = 1250$  N. Wytyczne IL-B-001 nie przewidują zwiększenia obciążenia w dolnym rejonie słupa, natomiast proponują stosowanie odpowiednich ochraniaczy na słupy. Nie zaktualizowana jeszcze norma PN-88/M-78321 – „Regały magazynowe wolno stojące. Wymagania i badania”, w tej materii powołuje się na normę PN-82/B-02004, która przewiduje bardzo duże siły uderzenia wóz-



Ryc. 7. Zewnętrzne siły dodatkowe wg FEM i IL-B-001 Źródło: opracowanie własne

ka o słup. Dotyczy ona jednak budowli, zatem spełnienie jej wymogów w przypadku regałów pociągałoby za sobą konieczność stosowania na słupy mocnych, gorąco walcowanych profili, porównywalnych ze słupami hal. W dobie konkurencji, przepis ten w odniesieniu do regałów jest martwy.

Oczywistym jest, że im wyżej następuje uderzenie ładunku, sztywność układu jako stosunek siły

do przemieszczenia jest mniejsza, a tym samym siła powodująca konkretne przemieszczenie jest również mniejsza. Proponuje się zatem polską dyrektywę w zakresie powyżej 0,5 m zharmonizować z przepisami FEM, a poniżej tej wysokości pozostawić zalecenie stosowania ochraniaczy.

W celu sprawdzenia wpływu wielkości omawianych tu czynników na warunek nośności w przypadku ściskania słupa z jednoczesnym jego zginaniem, poczyniono następujące założenia wynikające z doświadczenia autora artykułu:

- składniki A i B warunku stateczności po 45% całości (wartość jednakowa dla PN i FEM, co wykazano wcześniej)
- składnik C – 10% całości i pochodzi od momentu wywołanego siłą zewnętrzną  $H$  o wartości zależnej od przepisu, przyłożoną na wysokości równej połowie odległości między węzłami stężenia słupów, jednak nie mniejszej od 0,5 m (wpływ współczynnika  $\gamma_M$ )
- 30% składnika B pochodzi od momentu II rzędu (wpływ współczynników  $\gamma_f$  i  $\gamma_S$ )
- 70% składnika B pochodzi od zginania belki rygla i wywołanego w ten sposób momentu w słupie (wpływ współczynników  $\gamma_f$ ,  $\gamma_S$ ,  $\beta$ ).

Uwzględniając powyższe oraz mając na uwadze równanie warunku stateczności:

$$a \cdot \gamma_f \cdot \gamma_M + b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_M (d + e \cdot \beta) + c \cdot \gamma_M = 1,$$

$$\text{dla FEM} \\ a = 0,292; b = 0,292; c = 0,091; \\ d = 0,3; e = 0,56; \beta = 1,25.$$

Po podstawieniu tych liczb i współ-

czynników charakterystycznych dla PN-90/B-03200 do powyższego równania, warunek nośności przyjmuje wartość 0,98, co oznacza, że określona nośność wg PN byłaby nieznacznie większa od określonej wg przepisów FEM. Poczyniono tu uproszczenie polegające na przyjęciu liniowej zależności momentów II rzędu od wartości współczynnika obciążenia, mimo że w rzeczywistości zależność ta jest nieliniowa (ryc. 6). Dodatkowo przyjęto liczbę jednostek ładunkowych = 1, co daje największy wpływ różnicy współczynników dynamicznych (pojawiających się podczas wstawiania jednostki ładunkowej do gniazda) na wielkość składnika A warunku stateczności. Dla liczby jednostek ładunkowych = 3, dla której oszacowany zgrubnie „zastępczy” współczynnik  $\beta' = 1 + \frac{\beta - 1}{3}$ , co dla PN daje wartość = 1,17 a dla FEM = 1,08, warunek stateczności przyjmuje wartość: dla FEM 0,95 a dla PN – 0,91. Widać, że liczby te są porównywalne. Porównanie przeprowadzono przy założeniu stosunkowo niskiego udziału warunku stateczności słupa w całkowitym warunku jego nośności. Przyjęta do analizy wartość 45% jest bardzo niska. W praktyce liczba ta osiąga wartość 70%, co działa na korzyść normy krajowych.

To bardzo zgrubne oszacowanie pokazuje, że i w tym przypadku tak duże różnice we współczynnikach między obydwojma porównywanymi przepisami dają zbieżność wyników w postaci nośności regału. Nie porównywano tu regałów obciążonych siłą  $H$  poniżej poziomu 0,5 m, ponieważ byłoby to porównanie ze sobą dwóch odmiennych typów regałów:

- regału o słupach chronionych przed uderzeniem, dla którego przyjmuje się małe obciążenie dodatkowe
- regału bez ochrony słupów, ale za to bardziej obciążonych siłą zewnętrzną.

Zarówno jedno, jak i drugie rozwiązanie wiąże się z koniecznością poniesienia pewnych dodatkowych kosztów – w jednym przypadku – z wykonaniem osłon, a w drugim – z zastosowaniem mocniejszych słupów. Wydaje się, że pod względem zapewnienia bezpieczeństwa, metoda stosowania ochraniaczy jest bardziej efektywna.