

Тема 9:  
*Розрахункові  
сполучення  
зусиль та  
навантажень*

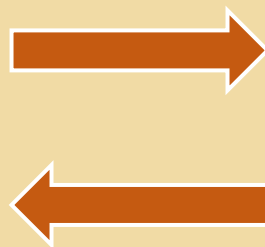
# План:

1. Принципи визначення розрахункових сполучень зусиль.
2. Формування РСЗ у ПК «ЛІРА САПР».
3. Розрахункові сполучення навантажень.

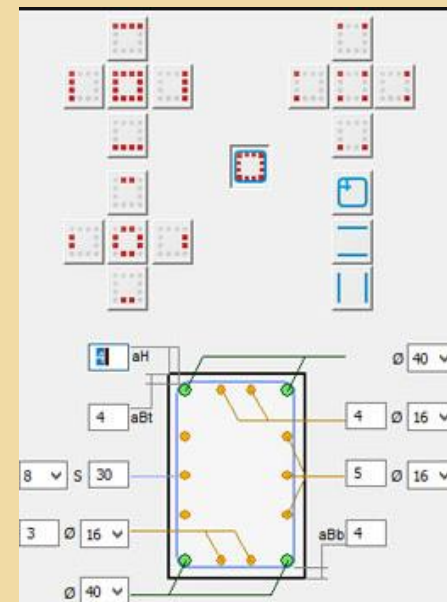
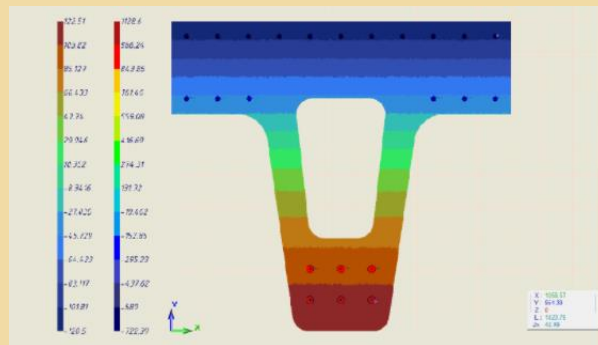
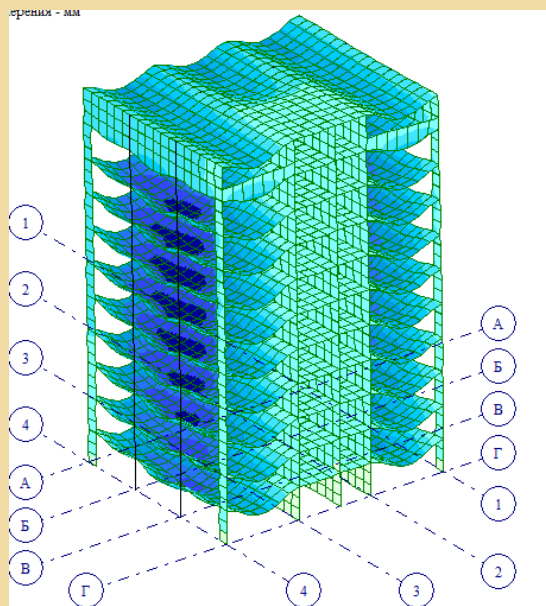


# Задача про визначення найбільш небезпечних поєднань завантажень (одна із основних)

Результати  
розрахунку  
споруди



Конструювання  
елементів  
споруди

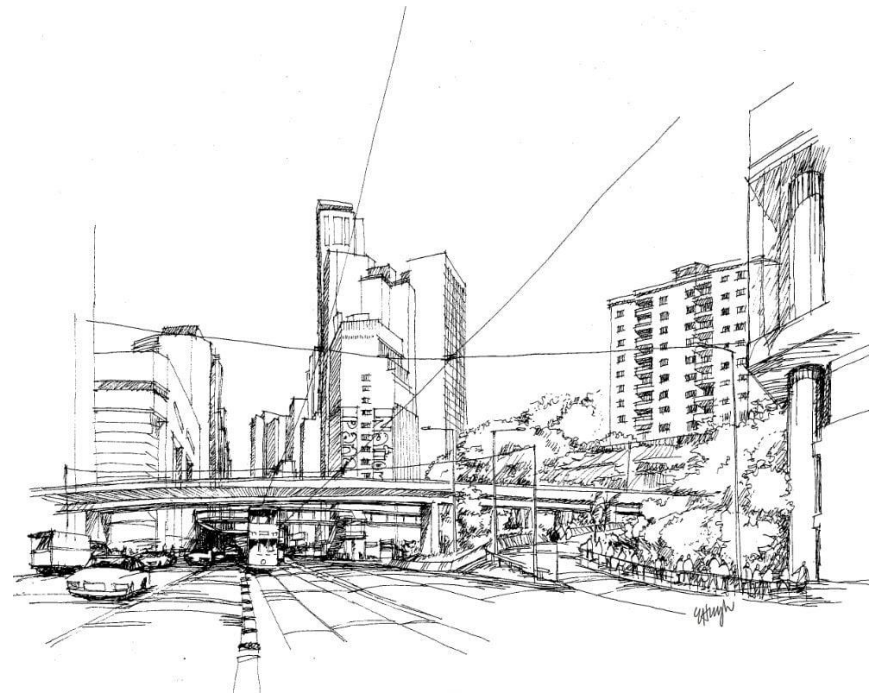


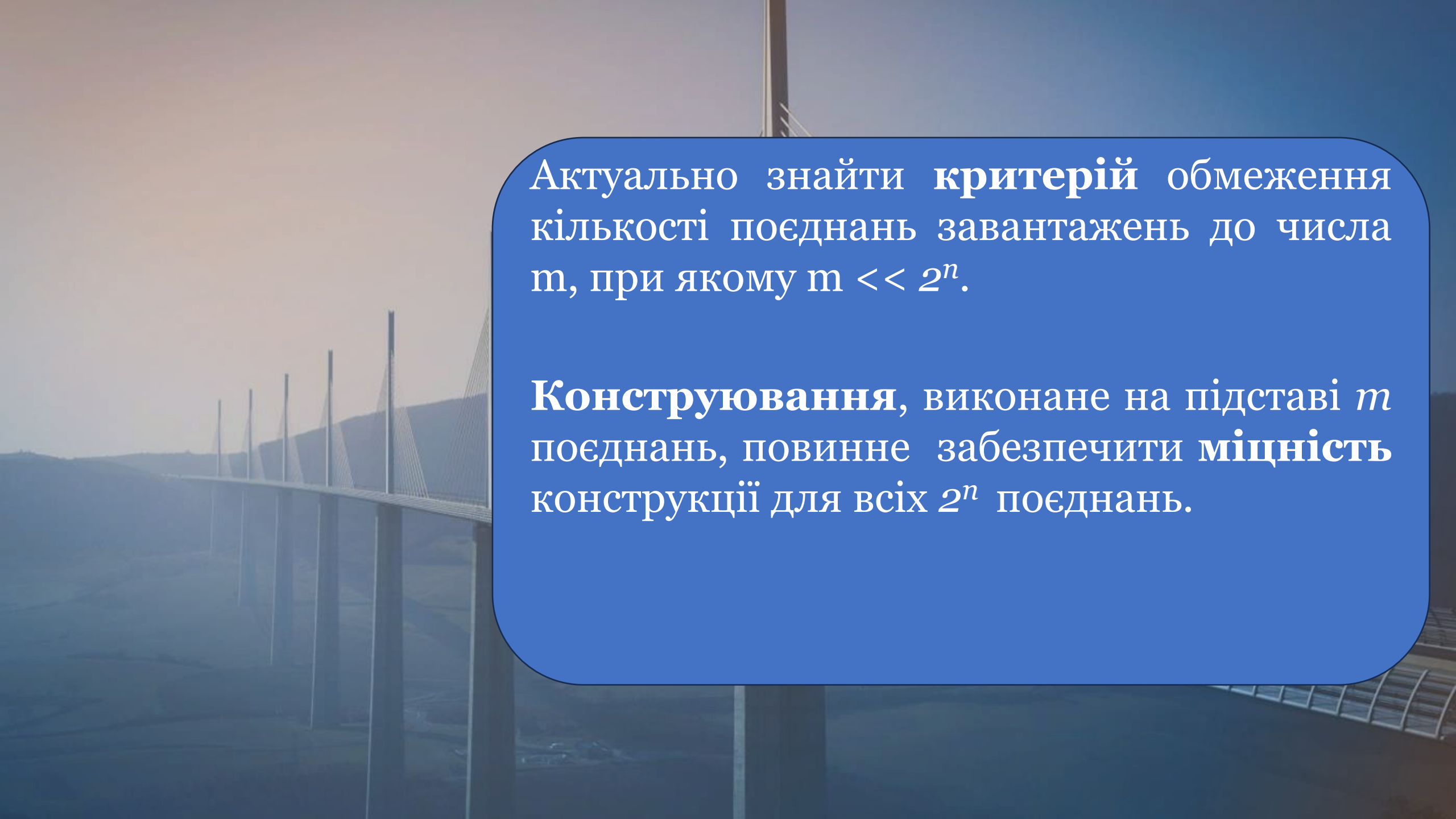
Кількість поєднань  
завантажень у  
загальному випадку –  
 $2^n$ , де  $n$  - кількість  
завантажень.

Вже порівняно  
невелике  $n$   
призводить до  
значного ускладнення  
розрахунку і  
аналізу  
результатів.

Кількість поєднань  
завантажень у загальному  
випадку –  $2^n$ , де  $n$  -  
кількість завантажень.

Вже порівняно невелике  $n$   
призводить до значного  
ускладнення **розрахунку**  
і **аналізу результатів**.





Актуально знайти **критерій** обмеження кількості поєднань завантажень до числа  $m$ , при якому  $m \ll 2^n$ .


**Конструювання**, виконане на підставі  $m$  поєднань, повинне забезпечити **міцність** конструкції для всіх  $2^n$  поєднань.

У докомп'ютерний період відбір  $m$  невиконаних поєднань проводився для кожного перерізу стержня на підставі критеріїв типу  $N_{max} + M_{відпов}$ ,  $M_{max} + N_{відпов}$  і подібних.

Проте ці критерії мали ряд недоліків, тому, застосовуючи МСЕ, почали користуватися **принципом пружного потенціалу.**

При визначенні **розрахункових сполучень зусиль (РСЗ)** враховуються особливості пружного потенціалу, характерні для перерізів **стержнів, пластин, оболонок і об'ємних тіл.**





Ці особливості дозволяють виразити розв'язок задачі через **критерій екстремального напруження** в характерних точках перерізів.

Ці особливості дозволяють полегшити розв'язування задачі, значно обмеживши кількість РСЗ, при цьому не втративши найнебезпечніших із них.



## **Критерії для стержня -**

екстремальні значення в контрольних точках перерізу:

- **нормального напруження;**
- **дотичного напруження.**

Для критерію по

**нормальному**

**напруженню** можна

використовувати формулу :

$$\sigma_k = \frac{N}{F} - \frac{M_y}{I_y} Z_k + \frac{M_z}{I_z} Y_k$$

де  $k$  – точка перерізу стержня (  $k = 1...8$  ).

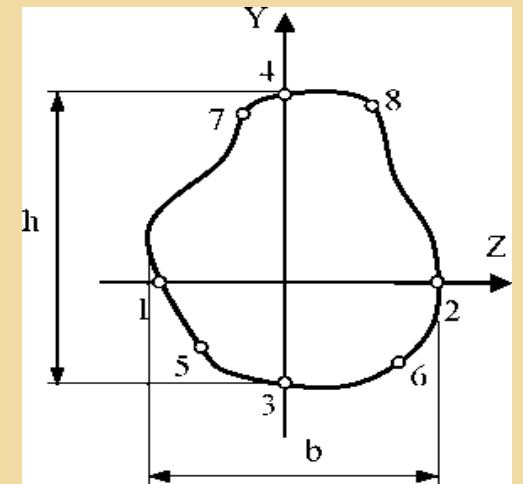


Рис. 1 - Контрольні точки для перерізу стержня

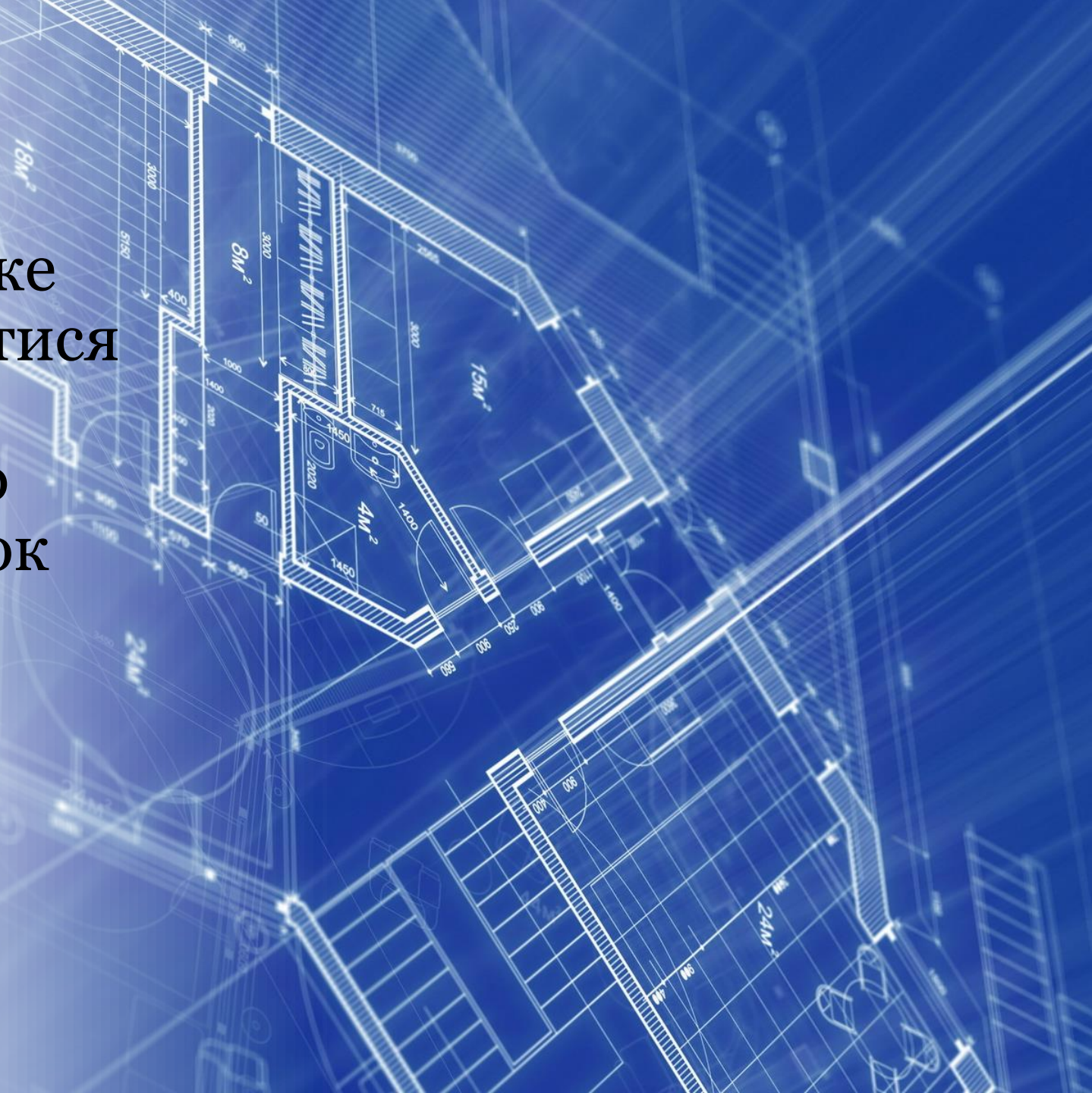


Для критерію по **дотичному напруженню** може використовуватися наближена формула :

$$\tau_k = \frac{1}{2F} \left( Q + \frac{M_{кр}}{h + b} \right)$$

де  $h$  і  $b$  – відстані між контрольними точками, що лежать на перетині головних осей інерції та контура.

**Вибір контрольних точок** – завдання не дуже просте. Тут треба керуватися різними міркуваннями, наприклад, про те, що до складу контрольних точок мають бути включені найбільш віддалені від центру тяжіння перерізу точки контуру.



У ПК «ЛІРА САПР» контрольні точки для стандартних перерізів входять до складу характеристик цих перерізів.

Окрім **екстремальних напружень** обчислюються також екстремальні значення **поздовжньої та поперечних сил**. Всього для перерізу стержня визначається значення 34 параметрів НДС.

## ***Критерії для плоского напруженого стану.***

У загальному випадку головне напруження в одній і тій же точці конструкції для різних завантажень має різну орієнтацію.

Тому тут визначення РСЗ проводиться по **огиначаючих екстремальних кривих нормального і дотичного напруження** за формулами:

$$\sigma_{\alpha n} = N_x \cos^2 \alpha_n + N_z \sin^2 \alpha_n + T_{xz} \sin 2\alpha_n$$
$$\tau_{\alpha n} = \frac{1}{2} (N_z - N_x) \sin 2\alpha_n + T_{xz} \cos 2\alpha_n$$

де  $n$  - номер завантаження,  
позначення приведені на рис. 2.

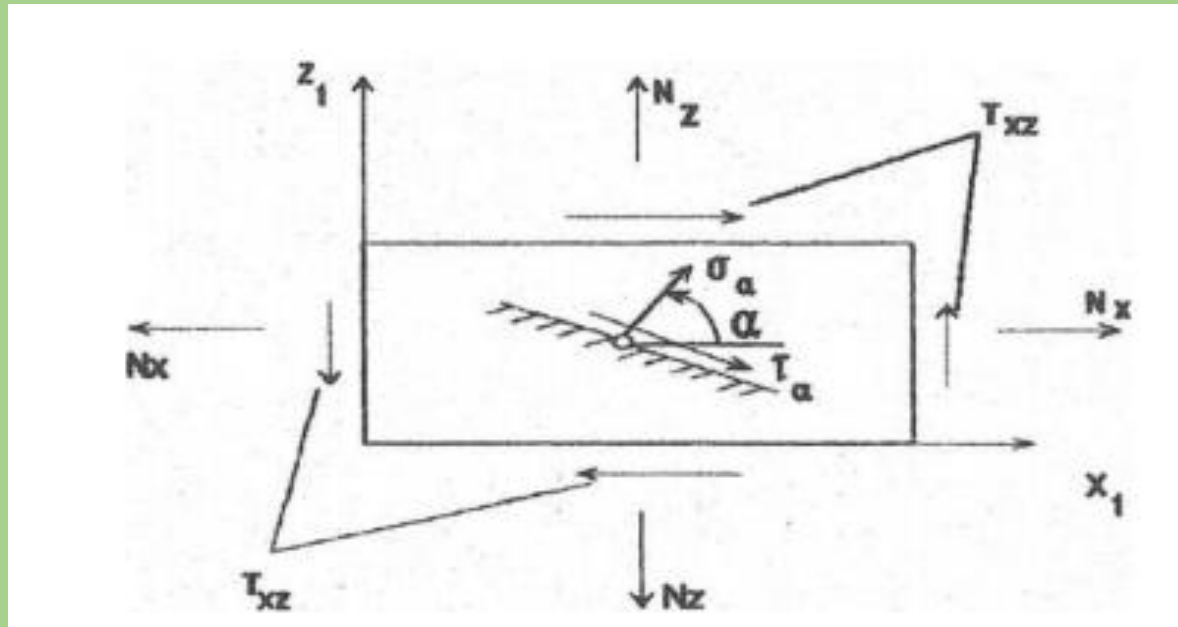


Рис. 2 - Плоский напружений стан

**Нормальні** напруження обчислюються в діапазоні від  $90^\circ$  до  $-90^\circ$ , а **дотичні** - від  $90^\circ$  до  $0^\circ$  з кроком  $5^\circ$ .

## *Критерії для тонких плит.*

Тут застосовується підхід, аналогічний тому, який описаний для плоского напруженого стану.

**Згинальний і крутний моменти** в плиті дають можливість визначити **нормальні і дотичні напруження на верхній і нижній** поверхнях плити. Ці напруження по модулю рівні, тому формули набувають вигляду:

$$\sigma_{\alpha n} = M_x \cos^2 \alpha_n + M_y \sin^2 \alpha_n + M_{xy} \sin 2\alpha_n$$

$$\tau_{\alpha n} = \frac{1}{2} (M_y - M_x) \sin 2\alpha_n + M_{xy} \cos 2\alpha_n$$

## Критерії для оболонок.

Тут також можливий аналогічний підхід. Напруження обчислюється на **верхній** і **нижній** поверхнях оболонки. При цьому враховуються **мембранні** напруження і **згинаючі** зусилля:

$$\sigma_x^{H/B} = N_x \pm \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_y^{H/B} = N_y \pm \frac{6M_y}{h^2}; \quad \tau^{H/B} = T_{xy} + \frac{6M_{xy}}{h^2}$$

де  $h$  – товщина оболонки;

$v, n$  – індекси, що означають приналежність до верхньої та нижньої поверхні оболонки.



*Критерії для тривимірного напруженого стану.*

**Критерієм для визначення небезпечних поєднань напружень в загальному випадку НДС**

**екстремальні  
значення  
середнього  
напруження**

**головні  
напруження  
девіатора**

**Визначаються кути нахилу головних напружень в кожному елементі для кожного завантаження.**

**Обчислення проводиться за формулами:**

$$\sigma_{\phi} = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} ln + 2\tau_{yz} mn;$$

$$S_x = \sigma_x - \sigma_0; \quad S_y = \sigma_y - \sigma_0; \quad S_z = \sigma_z - \sigma_0;$$

$$S_{\phi} = S_x l^2 + S_y m^2 + S_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + 2\tau_{xz} ln + 2\tau_{yz} mn$$

де  $\sigma_{\phi}$  – нормальне напруження на площадці з направляючими косинусами  $l, m, n$  до осей X, Y, Z;  
 $S_{\phi}$  – нормальне напруження девіатора на цій же площадці;

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

– середнє напруження



При визначенні РСЗ  
враховуються **ЛОГІЧНІ**  
**ЗВ'ЯЗКИ** між  
**завантаженнями**, що  
відображають **фізичний**  
**ЗМІСТ** завантажень і  
**ВИМОГИ**, що  
регламентуються різними  
нормативними  
документами.

**Виділяються три типи  
завантажень**

**незалежні** (власна вага,  
вага устаткування і т.п.)

**взаємовиключні** (вітер  
зліва і вітер зправа,  
сейсмічна дія уздовж  
різних осей координат і т.  
п.)

**супутні** (гальмівні за  
наявності вертикальних  
навантажень кранів)

У програмному комплексі реалізовано 9 видів завантажень, за допомогою яких програмно забезпечується їх коректний логічний взаємозв'язок (табл. 1).

**Таблиця 1** - Значення коефіцієнтів РСЗ за замовчуванням

Вид завантаження	Коефіцієнт $\gamma_{fm}/\gamma_{fe}$	Доля тривалості $\psi_g$	Коефіцієнти зусиль $W_i$			
			Основні сполучення		Аварійні сполучення	
			1-е	2-е	сейсміка	без сейсм.
<b>(0) постійне</b>	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0
<b>(1) тривале</b>	1.2	1.0	1.0	0.95	0.8	0.95
<b>(2) короткочасне</b>	1.0	0.35	1.0	0.90	0.5	0.8
<b>(3) кранове</b>	1.1	0.6	1.0	0.90	0.0	0
<b>(4) гальмівне</b>	1.1	0	1.0	0.90	0.0	0
<b>(5) сейсмічне</b>	1.0	0	0	0	1.0	0
<b>(6) епізодичне</b>	1.0	0	0	0	0	1.0
<b>(7) миттєве</b>	4.76	0	1.0	0.9	0.5	0.8
<b>(9) неактивне</b>	0	0	0	0	0	0

**При цьому для кожного з видів завантажень  
задаються наступні параметри**

**коефіцієнт надійності**  
 $\gamma_{fm}$

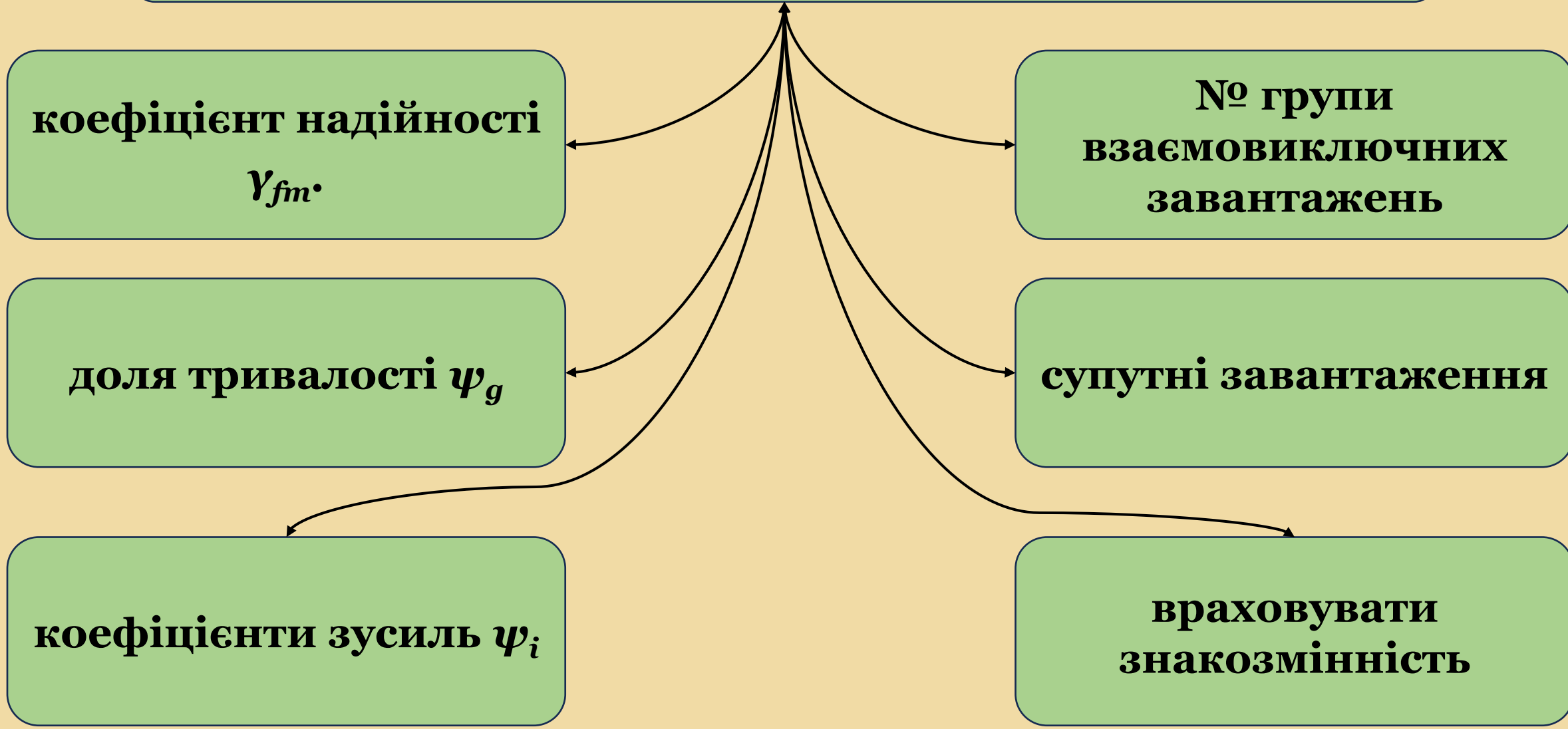
**№ групи  
взаємовиключних  
завантажень**

**доля тривалості  $\psi_g$**

**супутні завантаження**

**коефіцієнти зусиль  $\psi_i$**

**враховувати  
знакозмінність**



## На логічні зв'язки між завантаженнями накладаються деякі обмеження

завантаження видів **0** і **3** не можуть бути знакозмінними

подвійна супутність (супутність одного і того ж завантаження двом іншим і більше) не допускається

об'єднання завантажень допускається для видів **1, 2, 7**

ніяке супутнє завантаження не може бути включене в групи об'єднання і взаємовиключення

завантаження виду **4** (гальмівне) може бути супутнім лише для завантаження виду **3** (кранове)

допускається вводити до 9 груп об'єднання або взаємовиключення

завантаження видів **1, 2, 5, 6, 7** можуть бути супутніми для завантажень **1, 2, 5, 6, 7** у будь-якій комбінації

динамічне завантаження не може бути супутнім

## Недоліки режиму РСЗ

не можна побудувати для РСЗ деформовану схему, епюри зусиль та ізополя напружень, оскільки завантаження, що входять в РСЗ для різних елементів не корельовані, а це утрудняє аналіз РСЗ.

РСЗ жорстко прив'язані до принципу суперпозиції, а це означає, що розрахунок може бути проведений лише в лінійно-пружній постановці. В даний час це може бути просто неприйнятним. Наприклад, сучасні норми багатьох країн по залізобетону регламентують обов'язковий розрахунок з врахуванням властивостей реологій залізобетону, тобто з врахуванням фізичної нелінійності.

**Переваги режиму РСЗ - можливість урахування найбільш не вигідних комбінацій зусиль.**



$$PCN 1 = П + Д + К + K_p + Г + М$$

$$PCN 2 = П + 0,95Д + 0,9К + 0,9(K_p + Г) + 0,9М$$

$$PCN 3 = 0,9П + 0,8Д + 0,5К + С + 0,5М$$

$$PCN 4 = П + 0,95Д + 0,8К + Е + 0,8М$$

Інший підхід, заснований на складанні **розрахункових поєднань навантажень (РСН)** широко поширений в країнах Європи і США. Згідно стандартів EUROCODE та ДБН В.1.2-2:2006 споруду необхідно розрахувати на наступні РСН:

Не дивлячись на те, що вірогідність упущення небезпечних поєднань для деяких елементів в порівнянні з РСЗ зростає, **можливість візуалізації** результатів розрахунку для певного РСН, а також можливість проведення розрахунку в **нелінійній постановці** (в даному випадку РСН можна трактувати як окреме навантаження) робить цей підхід в даний час більш привабливим.

**Дякую за увагу!**