

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ШПРЕНГЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ПОСТАДІЙНОЇ РОБОТИ

Розроблена методика розрахунку зусиль в статично невизначених комбінованих конструкціях при зміні положення математичної осі в балці жорсткості, що дозволяє на початковій стадії проектування моделювати напружено-деформований стан в елементах комбінованих конструкцій.

Ключові слова: пружна вісь, сталезалізобетонні конструкції, рівняння нерозривності деформацій.

Calculation of composite building structures shall be conducted in stages. Before concrete gains strength of monolithic slab, metal structure is the only to carry loading of its own weight, however after that composite reinforced concrete band carries the whole calculated loading where axis position get to change.

The article describes main principles of the technique of installation of imaginary hinges for the purpose of calculation of forces in static indefinite continuous structures under conditions of position change of mathematical axis in stiffening girder allowing to simulate the stress-strain state in the elements of combined structures at the initial design stage. This technique is used for the purpose of calculation and analysis of the results for combined structure with composite reinforced concrete top band and steel suspension with due consideration of its operation staging.

Key words: resilient axis, composite constructions, equation of continuity strain.

Мета роботи. Ціллю регулювання напруженого стану будівельних конструкцій є покращення раціональних рішень і технологічних процесів, їх виготовлення, монтажу та роботи при навантаженні. Проблема ж регулювання рівнонапруженого стану в елементах конструкцій на стадії проектування полягає в використанні методики розрахунку. Одним з напрямків вирішення задачі є використання методу, розробленого й апробованого на плоских перехресно-ребристих системах [1].

Постановка проблеми. Комбіновані континуальні плитно-балочні системи при розрахунках найбільш часто замінюють спрощеними дискретними фізичними моделями у вигляді стержневої статично невизначеної системи, елементи якої представляють геометричні осі балки і елементів підвіски, жорсткість яких у статичній схемі відповідає їхнім фактичним жорсткостям.

Розглянемо сталезалізобетонну конструкцію, що складається з $n=2$ поздовжніх металевих статично невизначених комбінованих конструкцій, які об'єднані в сумісну просторову роботу за допомогою монолітної залізобетонної плити (рис.1).

Окремо взята комбінована металева статично невизначена конструкція, що складається з балки жорсткості і елементів ферми, завантажена рівномірно розподіленим навантаженням q . Схема завантаження конструкції показана на рис.2. У результаті деформацій балки під навантаженням у статично невизначеній конструкції виникають не тільки зусилля, а й змінюється положення пружної осі балки і відповідно всіх вузлів ферми (рис.3).

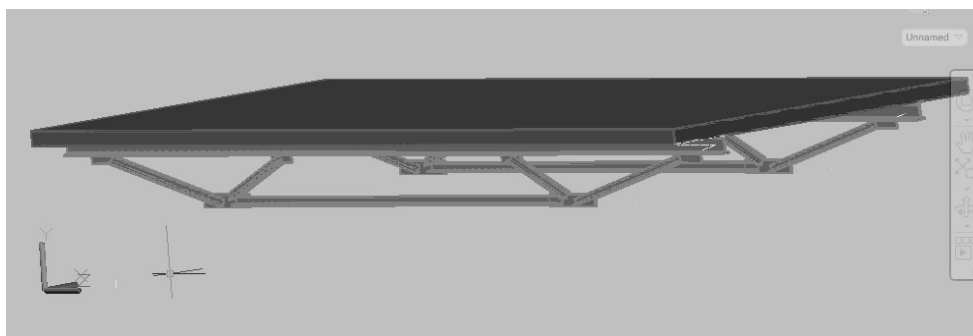


Рис. 1. Просторова комбінована статично невизначена сталезалізобетонна конструкція

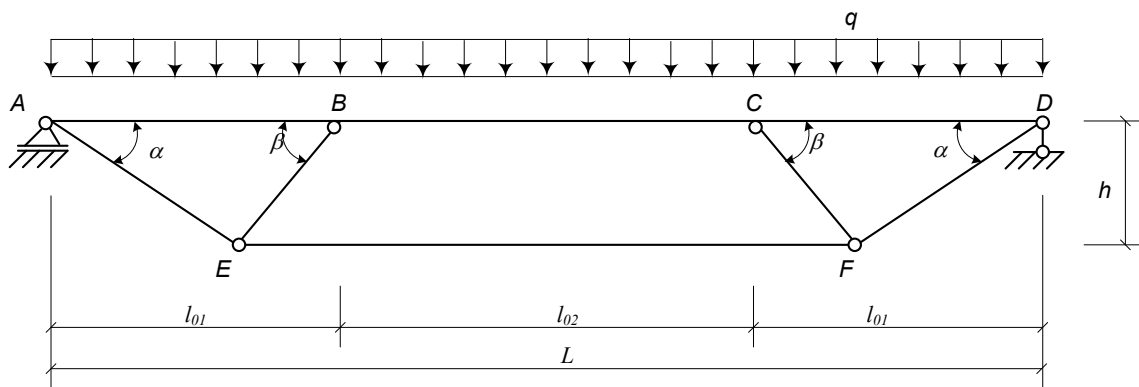


Рис.2. Вигляд комбінованої статично невизначеної конструкції

Методика розрахунку. Для подальшого розв'язку системи використаємо методику введення уявних шарнірів [1] для характерних в системі перерізів – в місцях можливих максимальних моментів в середніх частинах прольотів l_{01} і l_{02} . Розрахункова схема такої конструкції матиме вигляд, відображений на рис.3.

Розрахункова схема системи при введенні в верхньому поясі уявних шарнірів змодельована як конструкція, в якій у верхньому поясі основними зусиллями є невідомі згинальні моменти, поперечні і поздовжні сили, в нижній частині ферми виникають лише поздовжні зусилля (рис.3).

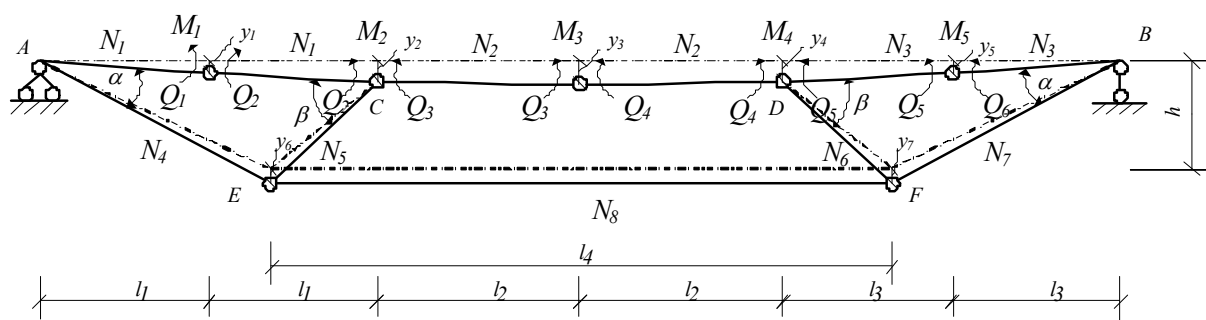


Рис.3. Розрахункова схема комбінованої конструкції.

В результаті деформацій комбінованої статично невизначеної конструкції під навантаженням змінюється положення її пружної осі. Позначимо через $n=0, \dots, i$ кількість характерних перерізів балки, в яких прикладені зовнішні навантаження або змінюються жорсткісні характеристики.

Запропонована методика базується на заміні фактичної пружної зігнутої осі балки на фіктивну з введенням уявних шарнірів з одночасним прикладанням згинаючих моментів в характерних точках, яким в реальній балці відповідають точки прикладання зовнішніх сил або перерізи зміни жорсткісних характеристик. Пружну зігнуту вісь зобразимо як вісь з $n = 0, \dots, i$ кількістю проміжних шарнірів, які внаслідок деформації змістились в вертикальному напрямі відповідно на величину y_{np} ($n=0, \dots, i$). Виникнення згинальних моментів

M_n , поперечних сил Q_m ($m=1, \dots, i$), поздовжніх сил N_m приймаємо як наслідок переміщення y_n точок (вузлів) пружної осі балки (рис.4).

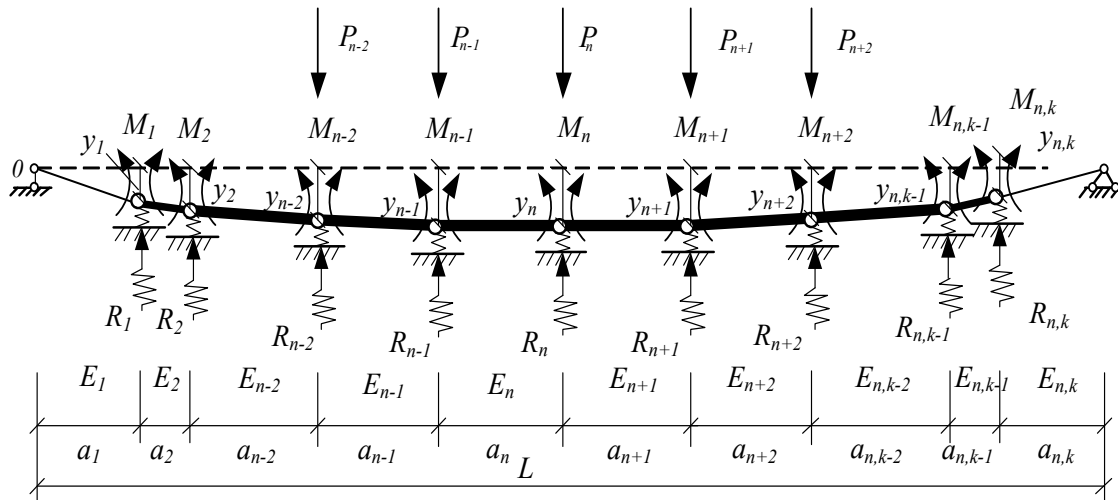


Рис.4. Розрахункова схема балки-жорсткості в деформованому стані

Кут взаємного повороту перерізів, які прилягають до n -ого уявного шарніра, викликаний згинальними моментами M_{n-1} , M_n , M_{n+1} , запишемо у вигляді:

$$\Delta_{nM} = M_{n-1} * \delta_{n,n-1} + M_n * \delta_{n,n} + M_{n+1} * \delta_{n,n+1} \quad (1)$$

Рівняння нерозривності деформацій (рівняння i -тих зусиль), які відображають взаємозалежність невідомих згинальних моментів по довжині балки жорсткості, невідомих поздовжніх сил в елементах конструкції та вертикальних переміщень всіх вузлів комбінованої конструкції, матимуть вигляд (2):

$$\begin{aligned}
& \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{14}X_4 + \delta_{15}X_5 + \delta_{16}X_6 + \delta_{17}X_7 - \frac{2y_1}{l_1} + \frac{y_2}{l_2} = 0 \\
& \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \delta_{24}X_4 + \delta_{25}X_5 + \delta_{26}X_6 + \delta_{27}X_7 + \frac{y_1}{l_1} - \frac{y_2(l_1+l_2)}{l_1 * l_2} + \frac{y_3}{l_2} = 0 \\
& \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \delta_{35}X_5 + \delta_{36}X_6 + \delta_{37}X_7 + \frac{y_2}{l_2} - \frac{2y_3}{l_2} + \frac{y_4}{l_2} = 0 \\
& \delta_{41}X_1 + \delta_{42}X_2 + \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \delta_{45}X_5 + \delta_{46}X_6 + \delta_{47}X_7 + \frac{y_3}{l_2} - \frac{y_4(l_1+l_2)}{l_1 * l_2} + \frac{y_5}{l_1} = 0 \\
& \delta_{51}X_1 + \delta_{52}X_2 + \delta_{53}X_3 + \delta_{54}X_4 + \delta_{55}X_5 + \delta_{56}X_6 + \delta_{57}X_7 + \frac{y_4}{l_1} - \frac{2y_5}{l_1} = 0
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\delta_{61}X_1 + \delta_{62}X_2 + \delta_{63}X_3 + \delta_{64}X_4 + \delta_{65}X_5 + \delta_{66}X_6 + \delta_{67}X_7 + y_6 = 0$$

$$\delta_{71}X_1 + \delta_{72}X_2 + \delta_{73}X_3 + \delta_{74}X_4 + \delta_{75}X_5 + \delta_{76}X_6 + \delta_{77}X_7 + y_7 = 0$$

Коефіцієнти δ_{ij} при невідомих рівнянь i -тих зусиль (2) запишуться у вигляді (3), наприклад:

$$\begin{aligned}
\delta_{11} = & \frac{2l'_1}{3EI_{red1}} - \mu * \frac{2}{l_1 GA_{red1}} + \frac{2\bar{N}'^2_{11} * l'_1}{6EA_{red1}} + \frac{2\bar{N}'^2_{12} * l'_2}{6EA_{red2}} + \frac{2\bar{N}'^2_{13} * l'_1}{6EA_{red3}} \\
& + \frac{\bar{N}'^2_{14} * h'}{6 \sin a EA_4} + \frac{\bar{N}'^2_{15} * h'}{6 \sin \beta EA_5} + \frac{\bar{N}'^2_{16} * h'}{6 \sin \beta EA_6} + \frac{\bar{N}'^2_{17} * h'}{6 \sin a EA_7} + \frac{\bar{N}'^2_{18} * (l - 2h * ctga)}{6EA_8}
\end{aligned} \tag{3}$$

де \bar{N}'_{ij} – величини поздовжніх сил від дії одиничних моментів у вузлах

балки комбінованої конструкції при зміненому положенні нейтральної осі;

l'_1, l'_2 – величини відповідно крайнього і середнього прольотів балки жорсткості;

h' – математична висота сталезалізобетонної конструкції;

$EI_{red1}, GA_{red1}, EA_{red1}, EA_{red2}$ – величини жорсткісних параметрів прольотів балки жорсткості.

До рівнянь нерозривності деформацій (2), яких недостатньо для знаходження невідомих X_i і y_i , добавимо рівняння статки, які знаходимо з рівноваги панелей і вузлів шпренгельної комбінованої конструкції.

Отримані рівняння нерозривності деформацій і статки формують систему лінійних алгебраїчних рівнянь, достатньою для знаходження невідомих

згинальних моментів M_{i1} ($i_1=1\dots i$), прогинів y_{i2} ($i_2=1\dots j$) і осьових поздовжніх сил N_{i3} ($i_3=1\dots k$).

При влаштуванні сталезалізобетонної статично невизначеної конструкції, зображеної на рис.1, проходить зміщення нейтральної осі балки жорсткості з причини зміни величини приведенного перерізу – від металевої балки жорсткості до сталезалізобетонної (рис.5).

Зміна жорсткісних параметрів балки $B(x)$ призводить до зміни топології статично невизначеної комбінованої сталезалізобетонної конструкції, а саме (рис.6, рис.7): проходить вертикальне зміщення математичної осі з положення $A-B$ в положення $A'-B'$ балки жорсткості; відбувається відповідне зміщення точок перетину осей дії поздовжніх сил елементів підвіски з новою

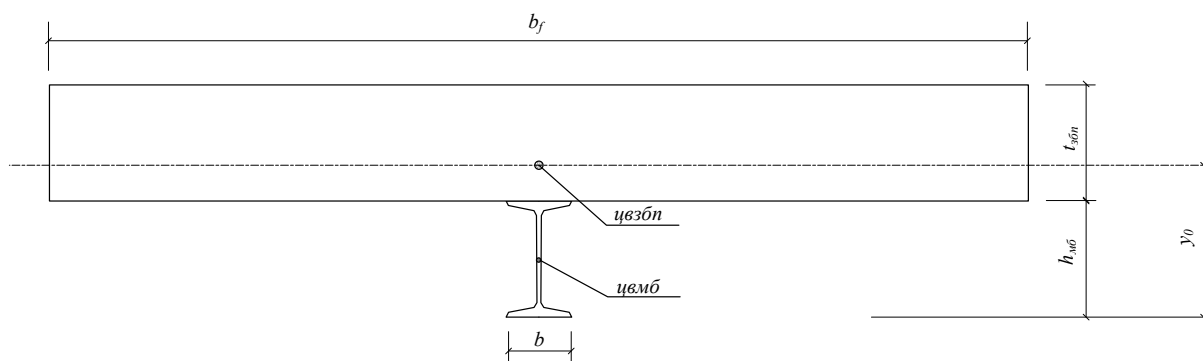


Рис.5. Поперечний переріз сталезалізобетонної комбінованої конструкції.

нейтральної віссю - з точок A, B, C, D в точки A', B', C', D' ; змінюються величини крайніх – від l_1 до $l'_1=l_1+\Delta y_0/tg\alpha+ \Delta y_0/\Delta\beta$ - (збільшуються) і проміжних від l_2 до $l'_2=l_2 - 2\Delta y_0/tg\beta$ - (зменшуються) прольотів балки жорсткості; збільшується висота самої конструкції: від h до $h'=h+\Delta y_0$. При переміщенні математичної осі на величину Δy_{0i} (рис.6) в верхньому опорному вузлі виникає вже на стадії влаштування монолітної залізобетонної плити від'ємний згинальний момент M_A , спричинений дією вертикальної складової N_{4y} поздовжньої сили N_4 в крайньому підкосі на величину горизонтального зміщення з точкою перетину математичної осі в сталезалізобетонній балці жорсткості $\Delta y_0/tg\alpha$.

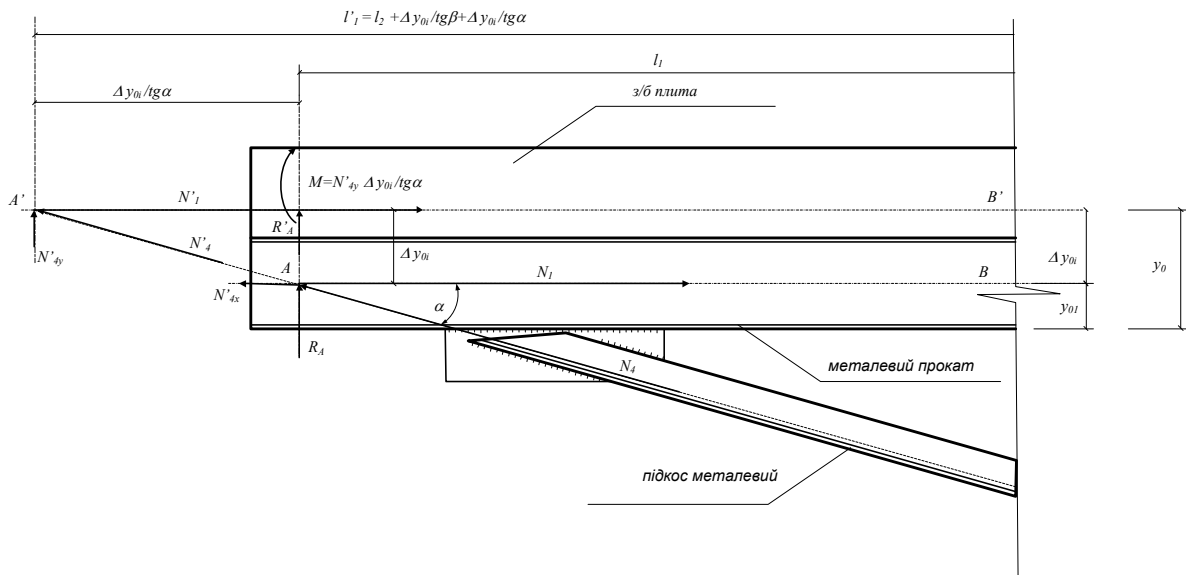


Рис.6. Крайній опорний вузол сталезалізобетонної комбінованої конструкції.

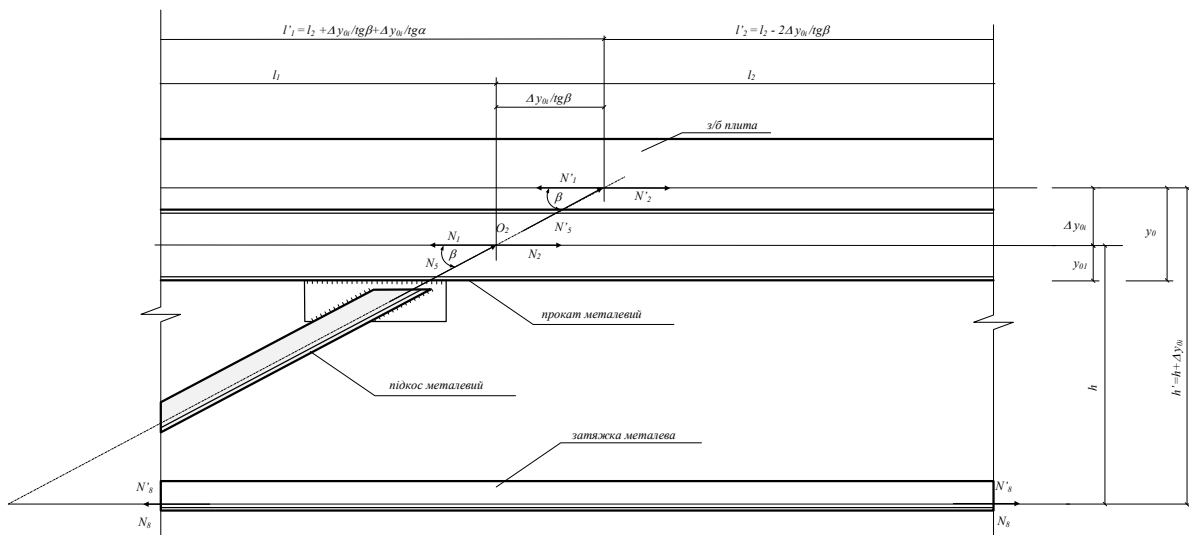


Рис.7. Проміжний вузол сталезалізобетонної комбінованої конструкції.

Проведені попередні теоретичні дослідження інших авторів на прикладі металевих комбінованих конструкцій дають можливість констатувати, що зміна положення математичної осі балки жорсткості в сталезалізобетонній комбінованій конструкції значно збільшує резерви несучої здатності конструкції в цілому.

При розрахунку металевих балок верхнього поясу комбінованої металеві конструкції, об'єднаних з залізобетонною плитою, необхідно враховувати

особливості їх роботи під навантаженням, пов'язані з прийнятим способом виготовлення конструкції. Регулювання зусиль в шпренгельній комбінованій сталезалізобетонній конструкції забезпечують сумісною взаємодією верхньої сталезалізобетонної частини і нижньої – металевої. Разом з тим регулювання напружено деформованого стану доцільно здійснити одночасно з технологічним методом, тобто постадійним включенням в роботу різних частин конструкції під час виконання робіт.

Для прикладу покажемо регулювання зусиль в металевій шпренгельній СНКК, верхня частина якої в процесі виконання будівельно-монтажних робіт працюватиме в складі сталезалізобетонної конструкції. В якості несучих конструкцій перекриття в середній частині будівлі запропоновані сталезалізобетонні комбіновані конструкції прольотом 18 м, влаштовані за схемою 6+18+ 6 м (рис.8).

На першій стадії проектування згідно розробленої методики розрахунку комбінованої однопрольотної металевої комбінованої конструкції прольотом 18 м шляхом покрокового розрахунку знайдено геометричні та пружні параметри її елементів.

Наступним етапом розрахунків був розрахунок перекриття за нерозрізною трьохпрольотною схемою роботи. В результаті бетонування і набору міцності бетоном в крайніх прольотах поперечні перерізи балок в цих прольотах з металевих перетворюються в сталезалізобетонні, жорсткісні характеристики яких значно перевищують початкові. В даному випадку зміщується положення нейтральної осі перетинів в сталезалізобетонній конструкції.

Розрахункова схема такої складної конструкції представляє собою нерозрізну комбіновану сталезалізобетонну і металеву конструкцію зі змінною вздовж жорсткістю з врахуванням зміни положення по вертикалі нейтральної осі. Величинами положення нейтральної осі є отримані в ході попереднього розрахунку вертикальні переміщення характерних вузлів конструкції (рис.9, в; табл.1, табл 2).

Розроблена методика розрахунку металевих комбінованих конструкцій передбачає в рівняннях нерозривності деформації зв'язок між згинальними моментами й вертикальними переміщеннями. У випадку зміни положення нейтральної осі рівняння нерозривності деформацій матимуть вигляд (4):

$$\delta_{m,k-2} X_{k-2} + \delta_{m,k-1} X_{k-1} + \delta_{m,k} X_k + \delta_{m,k+1} X_{k+1} + \delta_{m,k+2} X_{k+2} + \frac{y_{k-1} + y_{k-1}'}{l_1} - \frac{(y_k + y_k')(l_1 + l_2)}{l_1 * l_2} + \frac{(y_{k+1} + y_{k+1}')}{l_2} = 0 \quad (4)$$

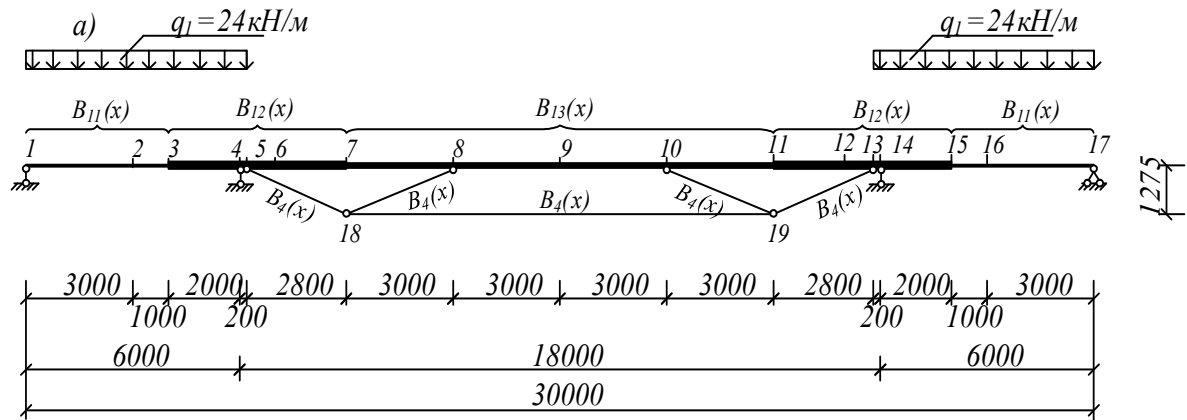
де y_{k-2}' , y_{k-1}' , y_k' , y_{k+1}' , y_{k+2}' – вертикальні переміщення, визначені в ході попередніх розрахунків для характерних вузлів конструкції.

Рівняння нерозривності деформацій (2) з врахуванням отриманих змін для балки жорсткості матимуть вигляд (5):

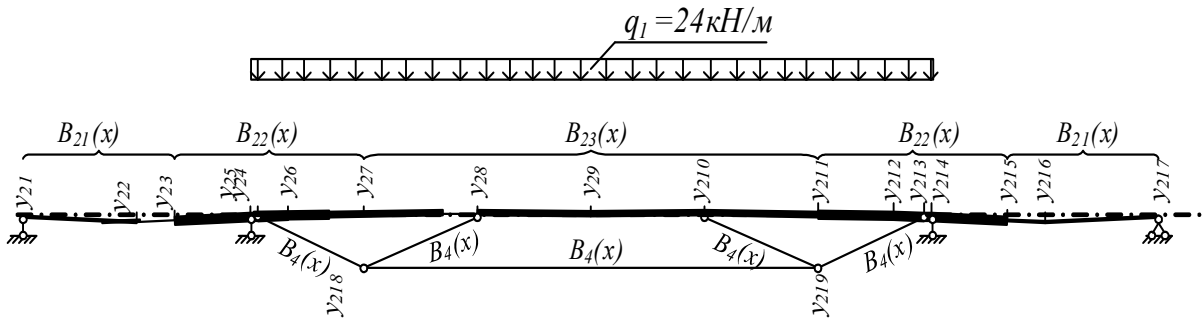
$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{14}X_4 + \delta_{15}X_5 + \delta_{16}X_6 + \delta_{17}X_7 - \frac{2y_1^*}{l_1} + \frac{y_2^*}{l_2} &= 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \delta_{24}X_4 + \delta_{25}X_5 + \delta_{26}X_6 + \delta_{27}X_7 + \frac{y_1^*}{l_1} - \frac{y_2^*(l_1+l_2)}{l_1 * l_2'} + \frac{y_3^*}{l_2'} &= 0 \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \delta_{35}X_5 + \delta_{36}X_6 + \delta_{37}X_7 + \frac{y_2^*}{l_2} - \frac{2y_3^*}{l_2} + \frac{y_4^*}{l_2} &= 0 \\ \delta_{41}X_1 + \delta_{42}X_2 + \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \delta_{45}X_5 + \delta_{46}X_6 + \delta_{47}X_7 + \frac{y_3^*}{l_2'} - \frac{y_4^*(l_1+l_2)}{l_1 * l_2'} + \frac{y_5^*}{l_1'} &= 0 \\ \delta_{51}X_1 + \delta_{52}X_2 + \delta_{53}X_3 + \delta_{54}X_4 + \delta_{55}X_5 + \delta_{56}X_6 + \delta_{57}X_7 + \frac{y_4^*}{l_1'} - \frac{2y_5^*}{l_1'} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\delta_{61}X_1 + \delta_{62}X_2 + \delta_{63}X_3 + \delta_{64}X_4 + \delta_{65}X_5 + \delta_{66}X_6 + \delta_{67}X_7 + y_6^* = 0$$

$$\delta_{71}X_1 + \delta_{72}X_2 + \delta_{73}X_3 + \delta_{74}X_4 + \delta_{75}X_5 + \delta_{76}X_6 + \delta_{77}X_7 + y_7^* = 0$$



б)



в)

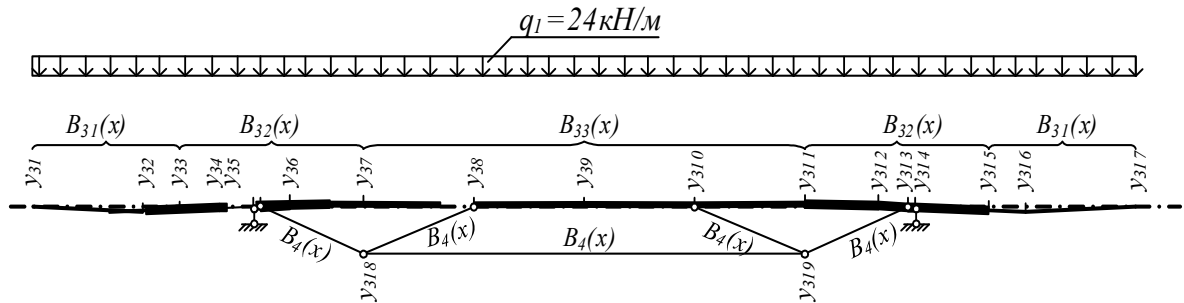


Рис.9. Схеми навантаження нерозрізної комбінованої конструкції: а) схема завантаження крайніх прольотів постійним навантаженням металеві частини шпренгельної комбінованої конструкції – стадія I; б) схема навантаження середнього прольоту постійним навантаженням сталезалізобетонної в крайніх і металеві в середньому комбінованої конструкції – стадія II; в) схема навантаження прольотів постійним і корисним навантаженням сталезалізобетонної комбінованої конструкції – стадія III.

Як показують проведені поетапно (постадійно) розрахунки, перетворення металевої комбінованої конструкції в нерозрізну сталезалізобетонну дозволяє зменшити розміри балки жорсткості. Разом з тим дещо збільшуються перерізи нижньої підвіски ферми, але їх затрати з економічної точки зору є незначними в порівнянні з рештою конструкції.

Висновок. Запропонований принцип введення уявних шарнірів в прийнятій розрахунковій схемі статично невизначеної комбінованої сталезалізобетонної конструкції можна віднести до універсальної і її застосування дає можливість більш простим способом на початковій стадії проектування за рахунок математичного апарату моделювати напружено-деформований стан в елементах конструкції, що дає можливість економічніше запроектувати конструкцію в цілому, в тому числі при зміні положення математичної осі балки жорсткості.

Література

1. ДБН В.2.6-160:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення (Текст] : чинний з 2011-09-01. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011. - 55 с.
2. Демчина Б.Г., Вибранець Ю.Ю., Іваник Ю.І. Розрахунок просторових попередньо напружених комбінованих сталезалізобетонних шпренгельних конструкцій // Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». Выпуск 82. Дніпропетровськ, 2015, ст. 77-84.
3. Гоголь М.В., Більський М.Р., Пелешко І.Д. Проектування і розрахунок комбінованих металевих конструкцій з регулюванням зусиль // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сб. науч. трудов ОГАСА. Часть 1. – Одеса, 2006. – С. 34–39.
4. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6 – 156:2010. Національний стандарт України. – Мінрегіонбуд України. – К., 2009. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України). – 118 с.
5. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. Національний стандарт України. – Мінрегіонбуд України. – К., 2009. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України). – 71 с.
6. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. Друга редакція (остаточна): ДБН В.2.6-163:2010. – Мінрегіонбуд України. – К., 2010. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України). – 127 с.