

БАГАТОПРОГОНОВІ ВАНТОВІ МОСТИ ТА ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ ЖОРСТКОСТІ

*Полікарпов А.О. ст. гр. ДМз-61-23,
Науковий керівник: д.т.н., проф. каф. МКіБМ Бугаєвський С.О.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Останніми роками багатопрогонові вантові мости набувають дедалі ширшого розповсюдження [1-3]. Так, на початку XXI століття було здано в постійну експлуатацію кілька споруд, до найвідоміших серед яких слід віднести мости Ріон-Антіріон у Греції, міст-віадук Мійо у Франції (рис. 1, 2), міст Золоті консолі в Канаді (рис. 3) та ін.



Рисунок 1 – Міст Мійо (Франція): а – вигляд; б – огорожа

Багатопрогоновий вантовий міст Мійо, на автодорозі Париж – Барселона в районі долини річки Тарн біля міста Тарна, побудований у 2004 р. Остаточний варіант проекту розроблено в 1996 р. англійським архітектором Норманом Фостером у співпраці з французьким інженером Мішеlem Вірложо.

Міст Мійо має на своєму рахунку три світові рекорди:

- найвища опора до балки жорсткості – 244,96 м;
- найвища опора мосту з пілоном – 343 м (що вище за Ейфелеву вежу Парижа);

- найвище розташування балки жорсткості над землею – 270 м.

Повна довжина мосту становить 2460 м (сім прогонів довжиною по 350 м). Ширина автопроїзду на мосту близько 27 м (по дві смуги руху в кожному напрямку). Полотно проїзду має невеликий поздовжній ухил і легку криву радіусом 20000 м (зроблену для того, щоб увага водіїв, які проїжджають мостом, була уважною, не притуплялося). Автомобілі, що проходять мостом, від бічного вітру захищають прозорі крани триметрової висоти (рис. 1, б).

Сім пілонів моста мають висоту 88,92 м та масу близько 700 т кожен. До пілонів кріпляться 11 пар вант розроблених співтовариством Фрейссіне і мають потрібний захист від корозії (гальванізація, покриття захисним воском і екструдованої поліетиленової оболонкою). Усього вант на мосту 154 шт.

Будівництво моста здійснювалося поздовжнім насувом з двох протилежних сторін (рис. 2), при цьому найскладнішим виявилось спорудження металеві балки жорсткості (рис. 3) загальною масою 36000 т, що вимагало зведення п'яти додаткових тимчасових опор. Коли консолі балки зустрілися один з одним, їхня розбіжність склала менше 1 см.



Рисунок 2 – Момент будівництва мосту Мійо

Щоб протистояти прогинам балки під час руху транспорту, для покриття мосту було розроблено спеціальний асфальтобетон на основі мінеральної смоли. Склад його м'який, що пристосовується до деформацій і не дає тріщин, а також стійкий, що відповідає автодорожнім критеріям (знос, щільність, структура, зчеплення, стійкість до деформацій та утворення колії, напливи, зрушення та ін.). Для пошуку такої «ідеальної формули» знадобилося два роки досліджень.

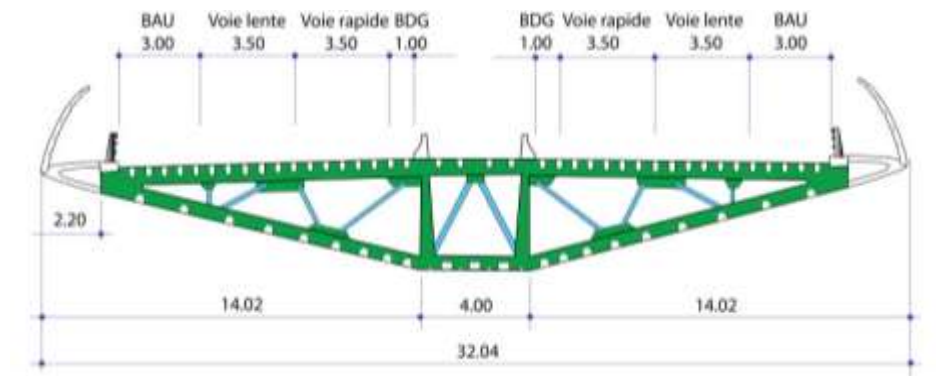


Рисунок 3 – Схема поперечного перерізу балки жорсткості мосту Мійо

Для повноцінної роботи моста по ньому прокладено понад 40 км кабелів високої та низької напруги, а також 20 км оптико-волоконних кабелів та змонтовано 357 телефонних з'єднань. Крім того, опори, балка, пілоні та ванті забезпечені приладами постійного моніторингу, що дозволяють робити до сотні вимірів в секунду, відстежуючи найменші коливання, зрушення і деформації, що виникають в процесі експлуатації споруди і контролювати їх вплив на конструкції. З їх допомогою ведеться спостереження за реакцією мосту на критичні погодні умови.

До відкриття мосту були проведені його випробування. Загальна вага випробувального навантаження становила понад 900 т (28 вантажівок). При завантаженнях середини одного з прогонів прогин балки становив трохи більше 26 см.

Загалом на будівництво мосту було витрачено 85000 м³ бетону та 36000 т

сталі. Загальна вага споруди становить 242000 т.

Згідно з технічним завданням, міст розрахований на 120 років експлуатації. Вартість будівництва склала близько €400 млн., при тому протягом 75 років компанія підрядник, отримала право стягувати плату за проїзд (зараз це €4,6).

Міст будувався близько 39 місяців, а для того щоб перетнути його на автомобілі, потрібно всього трохи більше хвилини.

Міст Золоті консолі (Golden Ears Bridge) є шестисмуговий міст, побудований 16 червня 2009 р. через річку Фрейзер у м. Ванкувері, Британська Колумбія, Канада (рис. 4). Міст був побудований в рамках державно-приватного партнерства вартістю 1 мільярд доларів (800 мільйонів євро). Міст має 160 вант діаметром 20 см кожна з 50 пасм, які утримують балку жорсткості.

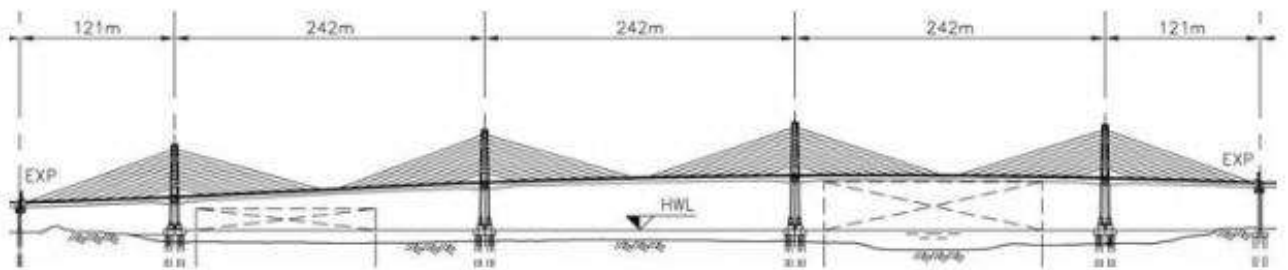


Рисунок 4 – Загальний вигляд та схема багатопрогонного мосту Золоті консолі (Канаді)

Принципова схема та схема робіть при завантаженні одного з прогонів

багатопрогонового вантового моста представлено на рис. 5.

Для багатопрогонових споруд величина основного прогону може бути рекомендована від 100 до 600 і більше м. При цьому величина бічних прогонів, висота пілонів і балки жорсткості, ширина пілонів по фасаду моста, довжина панелей, число вант і кути їх нахилу можуть бути прийняті аналогічно трипрогоновим вантовим системам розглянутим вище.

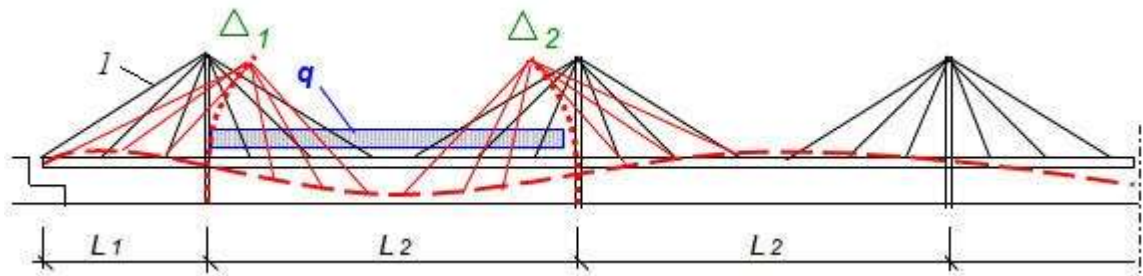


Рисунок 5 – Схема роботи під навантаженням багатопрогонового вантового моста ($\Delta_1 < \Delta_2$ якщо $L_1 < 0,25 \times L_2$): 1 – опорна ванта (відтяжка)

Основними особливостями багатопрогонових вантових мостів є:

- багаторазова статична невизначеність – труднощі забезпечення роботи гнучких елементів у суворій відповідності з розрахунком – складність контролю розрахункових зусиль у вантах;
- великі температурні переміщення та напруги в конструкціях;
- труднощі забезпечення необхідної вертикальної жорсткості конструкції при використанні гнучких пілонів – системи в цілому гнучкі (рис. 5).

Зважаючи на високу гнучкість багатопрогонових вантових систем, застосування їх без прийняття спеціальних заходів щодо збільшення жорсткості конструкції, як правило, не роблять.

Заходи щодо підвищення жорсткості багатопрогонових вантових мостів, загалом аналогічно тим, які використовують для висячих (рис. 6):

- розподіл багатопрогонових вантових систем за допомогою проміжних

анкерних опор на кілька трипрогонових (рис. 7);

- застосування жорстких пілонів (рис. 1 та 3);

- застосування горизонтальних та похилих попередньо напружених кабелів жорсткості та вант, що з'єднують пілон і балку (рис. 5);

- перехід до консольно-вантів (рамно-вантов) систем Моранді (рис. 8) та ін.

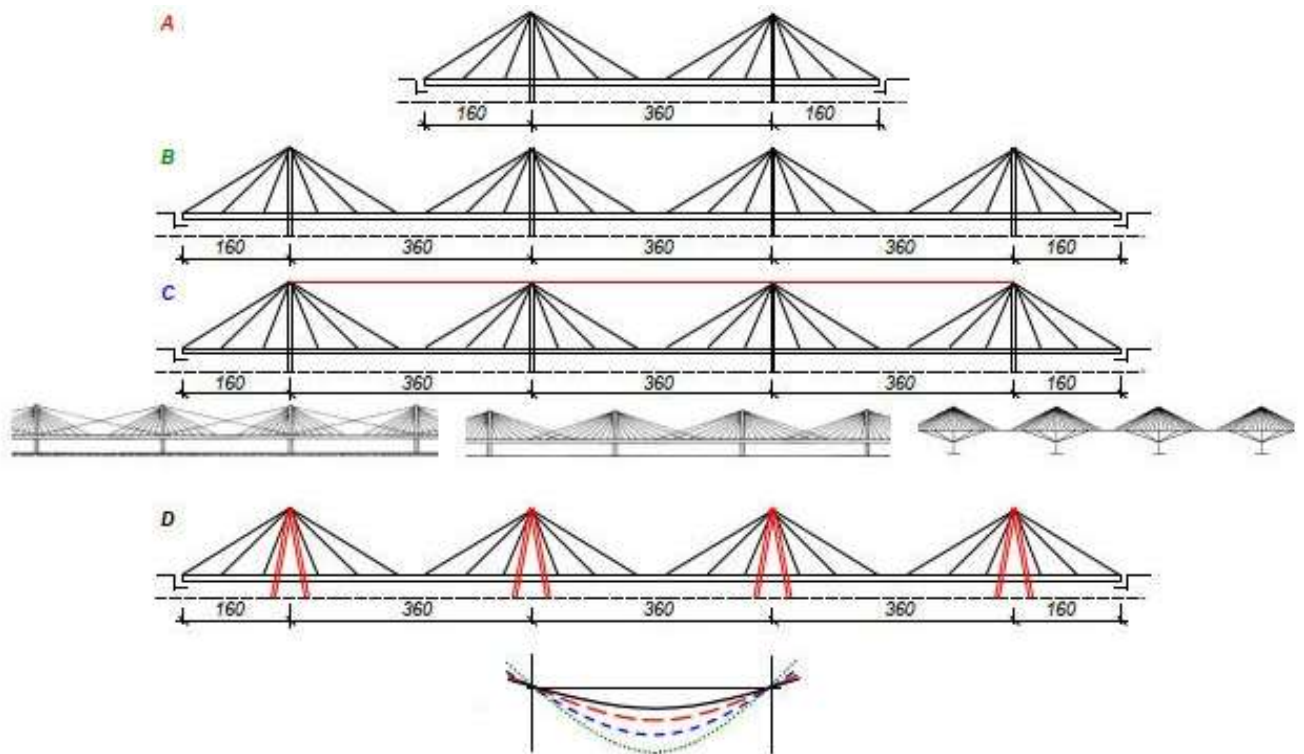


Рисунок 6 – Порівняння за жорсткістю різних вантових систем: А – 100% жорсткість; В – на 30% менше схеми А; С – на 10% менше схеми А; D – на 15% більше системи А

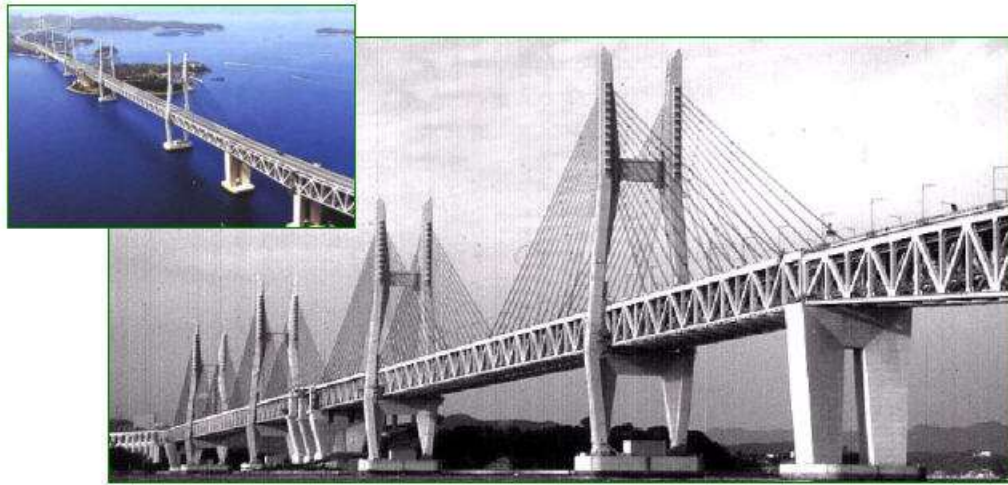


Рисунок 7 – Багатопрогоновий вантовий міст у Японії з проміжною анкерною опорою (схема вантової частини 185+420+185 м)

Перехід до консольно-вантових або рамно-вантових систем Моранді, що володіють підвищеною жорсткістю, але при цьому мало економічному через велику витрату залізобетону на рамні елементи та фундаменти опор широкого поширення не набув. Проте, в 1962 р. був побудований багатопрогоновий залізобетонний вантовий міст через озеро Маракаїбо у Венесулі з величиною основного прогону 235 м.

У період з 1958 по 1962 р. за проєктом італійського інженера Рікардо Моранді у Венесуелі був побудований мостовий перехід – Маракайбо (міст Генерала Урданета). Мостовий перехід має загальну протяжність 8678 м, у тому числі 406 м насип підходів і міст зі 135 прогонами загальною довжиною 8272,6 м за схемою: 22,6 + 2x44,6 + 65,8 + 15x85,0 + 160,0 + 5x235,0 + 160,0 + 11 x85,0 + 65,8 + 77x46,6 + 20x36,6 м. Прогони довжиною 22,6; 33,6 і 44,6 м – балкові розрізні; довжиною 65,8 і 85,0 м - рамно-підвісні; довжиною 160,0 м – перехідного типу, а прогони 235,0 м – рамно-підвісні з додатковими похилими попередньо напруженими вантами, встановленими в судноплавних прогонах моста (висота підмостового габариту – 45 м).



Рисунок 8 – Загальний вигляд вантових прогонових будов мосту через озеро Маракайбо (Венесуела)

Повна ширина мосту по поручнях 17,4 м, на мосту розташовано чотири смуги автомобільного руху шириною по 3,6 м, з розділовою смугою шириною 1,2 м і два тротуари шириною по 0,9 м. Проїзна частина, утворена верхніми полицями балок, попередньо напружена в поздовжньому і поперечному напрямках.

Значний інтерес становлять рамно-консольні (рамно-вантові) прогонові будови довжиною 235 м, з'єднані підвісними балками.

Це комбіновані прогонові будови, що складаються з двох основних ділянок. Одна ділянка на середині прогону перекрита підвісною балковою прогоновою будовою довжиною 45,96 м, що шарнірно спирається на консолі

ригелів; інша являє собою нерозрізну безшарнірну балку довжиною 189 м, яка в чотирьох місцях по довжині спирається на ХХ-подібну залізобетонну опорну раму, що є одночасно пілоном і ригелем і, крім того, підтримується двома похилими залізобетонними вантовими елементами (вантовим шпренгелем), закріпленими за 15 м від її кінців. Довжина консольних звисів ригеля 72,33 м.

Поперечний переріз головних балок у межах рамно-консольної будови – коробчатий трисекційний висотою 5 м (1/47 прогону), у межах підвісної будови – чотири головні балки таврового перерізу змінної висоти від 1,8 м біля шарнірів до 2,53 м у середині прогону (1/18 підвісного прогону). Коробчастий переріз головних балок складається з чотирьох елементів із товщиною стінок по 25 см, що збільшується до опори до 60 см. Верхня плита – плита проїзної частини – тієї самої конструкції, що й в інших прогонах моста, а нижня нерозрізна має товщину 20 см. Попереднє напруження нерозрізної балкової ділянки досягається як натягом арматури, так і дією горизонтальної складової зусиль похилих вант.

Похилі попередньо напружені вантові елементи складаються з чотирьох пучків сталевих канатів замкненого типу по 16 тросів діаметром 7,5 см кожний, з розрахунковим зусиллям по 150 т. Зусилля з нерозрізної балкової ділянки передаються на вантову балку за допомогою потужних попередньо напружених поперечних балок прогонової будови перерізом 2,0х6,5 м. Вант жорстко зацемлений на металевих опорних частинах пілонів. Найбільша величина натягу у вантах – 6586 т, мінімальна – 6027 т.

Залізобетонні пілони комбінованої прогонової будови складають загальну конструкцію з ХХ-подібними опорними рамами, а похилі стійки пілонів у нижній частині є елементами цих рам. Пілони мають чотиристійкову просторову конструкцію висотою 92 м над рівнем води. Висота пілонів над віссю балки жорсткості становить 44,5 м (1/5,3 прогону).

Точний розрахунок системи показав, що можна розраховувати її балочний елемент довжиною 189 м як нерозрізну систему на жорстких опорах, зокрема й у

місцях приєднання похилих вант. При цьому передбачено регулювання зусиль у вантах у процесі монтажу системи, внаслідок чого в експлуатаційний період опускання точок приєднання похилих вант до балки спричиняється тільки дією тимчасового навантаження. Розрахунок, проведений із введенням спрощувальних припущень, показав, що жорсткі вузли сполучення ригеля зі стійками та підкосами можна приймати шарнірними, за такого припущення система приводиться до двохарнірної рами з двосторонніми консолями, що на кінцях мають пружну піддатливу підвіску.

Ростверком кожної консольної ХХ-подібної опори є збірний блок із загальними розмірами в плані 34,6x39,0 м і товщиною 4,7 м. Для сприйняття розтягувальних зусиль ростверк має невелику кількість попередньо напружених кабелів. Загальний об'єм блоку ростверку кожної такої опори становить близько 6000 м³. Пальова основа складається з 62 попередньо напружених паль середньою довжиною 52 м, діаметром 1,34 м і вантажопідйомністю 1000 т.

Рамні Х-подібні опори складаються з чотирьох залізобетонних рам висотою до 40 м з відстанню між осями стійок поверху 20 м. Рами пов'язані взаємно в середині висоти і в рівні приєднання до них прогонових будов. Розміри рам постійні, за винятком нижньої частини, яка при виготовленні вкорочувалася з урахуванням необхідної висоти опор. Ці рами оберталися в V-подібність при висоті менше 20 м.

Проект мосту складено за італійськими технічними умовами. Для бетону міцністю 450 кг/см² напруга стиснення під час натягу не перевищувала 189 кг/см² і в експлуатаційний період – 144 кг/см², напруга в дроті діаметром 7 мм для кабелів замкненого типу під час натягу – 120 кг/мм² і в експлуатаційний період після прояву всіх втрат – 90 кг/мм².

Витрата основних матеріалів на 1 м² вантової частини моста склала для прогонової будови 0,93 м³/м² бетону і 86 кг/м² арматури.

Опору судноплавних прогонів, що складаються із середніх ХХ-подібних і

зовнішніх А-подібних рам, виготовляли з звичайного залізобетону в ковзній опалубці.

Нерозрізну прогонову будову довжиною 189 м для головних прогонів виготовляли трьома ділянками. Середню ділянку довжиною 48,5 м бетонували в металевій опалубці, яку підтримували поперечними балками А-подібної опори та стійками ХХ-подібної рами, що збирали на місці. Дві інші ділянки по 70 м бетонували в металевих опалубках, які встановлювали на тимчасові збірні металеві ферми, що монтували на будівельному майданчику і доставляли до місця на баржах.

Піднімали збірні металеві ферми з одного їхнього боку лебідками, встановленими на кінці консолі ХХ-подібної опори, а з другого – плавучим краном вантажопідйомністю 250 т із трьома висувними ногами та стрілою вильотом 63 м. Вільний кінець ферми встановлювали на спеціальну шарнірну опорну стійку, що спирається на тимчасовий металевий пальовий ростверк. Після вирівнювання домкратами положення ферм ділянки бетонували, створювали попередню напругу в бетоні та розпалубляли.

Основна складність закріплення і натягу похилих вантових елементів полягала в забезпеченні правильної передачі навантаження від ваги прогонових будов із тимчасових опор металевих ферм на похилі ванти, оскільки нерозрізна ділянка прогонової будови могла працювати лише після того, як одержала повне обтиснення від горизонтального додатка зусилля у вантах. Передачу навантаження забезпечували невеликими частинами шляхом невеликого спуску домкратами, що підтримують складальні ферми, і одночасного підтягування кабелів вант зі збереженням незмінності положення зовнішнього кінця балки на заданій позначці.

Після передачі постійного навантаження від ваги прогонової будови на нерозрізну її ділянку обетонували похилі ванти перерізом 1,2x1,2 м, що забезпечують роботу на розтягувальні напруження від дії тимчасового

навантаження в розмірах, які не перевищують $12,5 \text{ кг/см}^2$.

Насамкінець слід додати, що рамно-вантові конструкції, подібні до описаних вище, пропонували і в Японії для прогонових будов довжиною до 1000 м.

Перелік посилань:

1. Holger Svensson. Cable-Stayed bridges. 40 years of experience worldwide. 2012. 451 p.
2. Niels J. Gimsing, Christos T. Georgakis. Cable supported bridges. Concept and design. Third Edition. WILEY. 2012. 592 p.
3. Judith Dupré. Bridges. A history of the world's most spectacular spans. Black Dog & Leventhal Publishers. 2017. 350 p.