



# Processi di ottimizzazione per ponti e binario su ferrovie ad alta velocità

*Optimization facilities for bridges and track on high speed railways*

Vladimir Y. POLIAKOV<sup>(\*)</sup>

**Riassunto** - Il documento descrive i risultati sulla ricerca dell'ottimizzazione dell'interazione "ponte-binario-veicolo" per l'esercizio ferroviario ad alta velocità (fino a 400 km/h) per le tratte di linea su ponte. I criteri sviluppati consentono la stima di vari parametri di interazione dinamica per raggiungere i valori ottimali in funzione della sicurezza del contatto ruota-rotaia, dell'efficienza costruttiva, del comfort dei passeggeri e del deterioramento della massicciata. L'approccio descritto può essere implementato come una estensione delle esistenti procedure ed i relativi obiettivi non risultano in contraddizione con la normativa esistente.

## 1. Introduzione

La specializzazione della ricerca scientifica rende la nostra conoscenza dei fenomeni naturali più approfondita, ma ha portato alla separazione delle discipline e dei risultati mentre è utile una visione d'insieme. Tradizionalmente il binario, la sovrastruttura del ponte e il materiale rotabile sono studiati separatamente, il che conduce a semplificazioni per quanto riguarda l'interazione tra questi elementi. Il modello che usiamo suggerisce di considerare gli elementi principali di un sistema di trasporto ferroviario nella sua unità. In questo articolo si tenta di modellizzare il sistema di elementi che lavorano insieme simultaneamente per la loro ottimizzazione. Nella memoria si descrive l'integrazione degli elementi in un unico modello. In questo contesto analizzeremo il sistema "ponte-binario-veicolo" (BTCS) [1, 2]. È stata sviluppata la nozione di vibrazione controllata delle strutture mediante funzioni di controllo, che influisce sulla massa e sulla rigidità della struttura lungo il ponte o sulla sua estensione sospesa. L'obiettivo principale dell'ottimizzazione è l'efficienza della sovrastruttura del ponte, che fornisca stabilità al transito della ruota sulla rotaia alla velocità massima di 400 km/h. Un altro obiettivo è di ottenere una sollecita-

**Summary** - The paper describes the research results of the optimisation of "bridge-track-car" interaction for high-speed railway traffic (up to 400 km/h) in bridge zones. The developed criteria allow estimating various dynamic interaction parameters to reach the optimal dynamic parameters dealing with wheel-rail contact safety, material efficiency, comfort of passengers and ballast deterioration. The described approach can be implemented as an addition to the existing rules and these aims do not conflict with existing rules.

## 1. Introduction

Specialization of research makes our vision of nature more profound, but it has led to the separation of disciplines and results while the entire vision is useful. Traditionally the track, bridge superstructure and rolling stock are studied separately, which leads to simplifications regarding the interaction between these elements. The model we use suggests considering the main elements of a railroad carrier system in its unity. In this paper, we are making an attempt to model the system of elements that work together simultaneously for their optimisation. The paper describes the integration of the elements into a single model. In this context we will discuss the "bridge-track-car" system (BTCS) [1, 2]. We have developed the concept of controlled vibration of structures by means of controlling functions, that effects mass and stiffness of the structure along the bridge or the flyover zone length. The main goal of the optimisation is the material efficiency of the bridge superstructure, providing wheel motion stability on a rail at the maximum speed of 400 km/h. Another goal is to achieve even loading on the rail bed to prevent derangement of the track profile in the bridge zone. The suggested methodology is used at the pre-design stage for the design of the bridge superstructure and the track in the bridge zone including transitions.

<sup>(\*)</sup> Istituto del Binario, Costruzione e Struttura, Università Statale di Mosca per l'Ingegneria Ferroviaria (MIIT), Mosca, Russia.

<sup>(\*)</sup> Institute of Track, Construction and Structures, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

zione uniforme sull'armamento ferroviario per evitare modifiche non corrette della geometria del binario nella zona del ponte. La metodologia suggerita è utilizzata nella fase di fattibilità tecnica della progettazione della sovrastruttura del ponte e del binario nella zona del ponte e nelle zone di transizione di ingresso e di uscita.

È necessario spiegare che si prova a non considerare molti particolari che esistono nella realtà pratica. L'obiettivo principale è quello di sintetizzare la struttura consentendo un'interazione ottimale, in condizioni normali, per prevenire effetti negativi. Di conseguenza, questo approccio rende possibile la creazione di un sistema dinamico mediante una previsione del comportamento.

Quindi, parlando del BTCS, si considerano diversi fattori:

- efficienza costruttiva della sovrastruttura del ponte, ad es. riduzione delle masse;
- uniformità della sollecitazione sull'armamento ferroviario, ad es. deviazione minima della sollecitazione sull'armamento ferroviario lungo la zona del ponte;
- stabilità del transito della ruota per prevenire il deragliamento, ad es. la necessaria forza verticale generata nel contatto ruota-rotaia
- comfort, ad es. l'accelerazione verticale della cassa.

## 2. Il modello di sistema di trasporto

L'architettura strutturale del sistema di trasporto è stata discussa in [2]. Il modello introdotto è adeguato per considerare i parametri necessari tuttavia, d'altra parte, non essendo troppo complicato per applicare la teoria matematica del controllo ottimo che fu sviluppata da L. PONTRYAGIN nel 1960. Tra i procedimenti relativamente moderni si possono ricordare le opere [3, 4]. A differenza della classica teoria matematica del controllo ottimo, sono utilizzate funzioni di controllo che non sono funzione del tempo, ma dipendono dalla coordinata  $x$  che descrive la lunghezza della zona del ponte.

Il modello, mostrato nella fig. 1 [1,2], è adattabile alla maggior parte dei tipi di convoglio ad alta velocità (Pendolino, ICE, Eurostar (Classe 374), Siemens Velaro, Alfa-Pendular, ecc.) e prende in considerazione i seguenti parametri:

- Masse della cassa  $M_k$ , del carrello  $m_{i_k}$ , delle sale  $m_i$ , massa distribuita del binario  $m(x)$  e della sovrastruttura del ponte  $M(x)$ . Alcuni di questi parametri possono dipendere dalla coordinata  $x$ , se indicato. Per il binario, questo indica dipendenza della relativa massa dal passo di posa delle traverse  $\delta(x)$ .  $M(x)$  può essere regolata dalla funzione di controllo  $\alpha(x)$  che aiuta a ridurre la massa della campata e ad aumentare l'efficienza costruttiva. Nell'equazione si può osservare il ruolo e l'interpretazione delle funzioni di controllo  $\alpha, \delta, \gamma(1)$ .
- I momenti d'inerzia della cassa  $J_k$ , del carrello  $j_{i_k}$ , e del-

*It is necessary to explain that we do not try to consider many details occurring in practice. The main objective is to synthesize the structure allowing optimal interaction in regular conditions to prevent negative effects. As a result, this approach allows creating a dynamic system with predicted behaviour.*

*Thus, speaking about the BTCS we have to take into consideration several factors:*

- *material efficiency of bridge superstructure, i.e. mass reduction;*
- *evenness of the load on the rail bed, i.e. minimal deviation of the load on the rail bed along the bridge zone;*
- *wheel motion stability to prevent derailment, i.e. sufficient vertical force in wheel-rail contact;*
- *comfort, i.e. vertical acceleration of a car body.*

### 2. The carrier system model

*The structural arrangement of the carrier system was discussed in [2]. The model introduced is sufficient to consider the required parameters while, on the other hand, not being too complicated to apply the mathematical theory of optimal control that was developed by L. PONTRYAGIN in the 1960s. Among relatively modern procedures the works [3, 4] can be recalled. Unlike the classical mathematical theory of optimal control, we use the controlling functions that are not time-dependent, but depend on the coordinate that lies along the bridge zone length.*

*The model shown in fig. 1 [1, 2] is adequate for most types of high-speed trains (Pendolino, ICE, Eurostar (Class 374), Siemens-Velaro, Alfa-Pendular, etc.) and takes into account the following parameters:*

- *Mass of the car body  $M_k$ , bogie  $m_{i_k}$ , wheelset  $m_i$ , distributed mass of the track  $m(x)$  and bridge superstructure  $M(x)$ . Some of these parameters may depend on the  $x$ -coordinate, if indicated. For the track, it means dependence of the track mass on the sleeper spacing  $\delta(x)$ .  $M(x)$  can be adjusted by  $\alpha(x)$  controlling function that helps reducing the beam mass and raising material efficiency. The role and interpretation of  $\alpha, \delta, \gamma$  controlling functions can be seen in the equation (1).*
- *The moment of inertia of the car body  $J_k$ , bogie  $j_{i_k}$  and superstructure  $J(x)$ . The parameters may depend on the  $x$ -coordinate, if indicated.  $U(x)$  denotes the vertical stiffness of the rail bed, including fastening, under sleeper pads, ballast and embankment (if it exists), that can be adjusted by  $\gamma(x)$  function by means of multiplying this function by a certain starting value (before optimisation):*

$$U(x) = \gamma(x) \delta(x) U'(y_p - y_b)$$

*where  $(.)$  is the initial value of the rail bed stiffness (before optimisation). The  $\gamma(x)$  function is determined during optimisation by certain criteria and allows improving interaction in the system.  $U(x)$  depends on  $\delta(x)$*

la sovrastruttura  $J(x)$ . I parametri possono variare in base alla coordinata  $x$ , se indicato.  $U(x)$  identifica la rigidezza verticale dell'armamento ferroviario, comprendendo gli organi di attacco rotaia-traversa, le solette sotto-traversa, la massicciata ed il rilevato (se esiste), che può essere regolato dalla funzione  $\gamma(x)$ , mediante moltiplicazione di questa ultima per un determinato valore iniziale (antecedente alla ottimizzazione):

$$U(x) = \gamma(x)\delta(x)U'(y_p - y_b)$$

dove  $U'(\cdot)$  è il valore iniziale di rigidezza dell'armamento ferrovia-

rio (non ottimizzato). La funzione  $\gamma(x)$  è determinata durante l'ottimizzazione mediante alcuni criteri e permette di migliorare l'interazione nel sistema. Anche  $U(x)$  dipende anche da una funzione di controllo  $\delta(x)$ .  $J(x)$  può essere modificato dalla stessa funzione  $\alpha(x)$  così come indicato nell'equazione (1).

- Lo spostamento verticale  $y(x,t)$  della rotaia, dipendente dalla coordinata  $x$  e dal tempo e dalle condizioni al limite  $y(0,t)$ ,  $y(L,t)$  e lo spostamento verticale della sovrastruttura del ponte  $y_b(x,t)$ . Tali spostamenti permettono di calcolare tutti i parametri necessari per stimare il comportamento del BTCS: il momento flettente, la sollecitazione sull'armamento ferroviario, ecc.
- $G_k$ ,  $C_k$ ,  $G_v$ ,  $C_v$ ,  $P_{ti}$ ,  $R_i$  indicano i parametri di rigidezza ( $G$ ) e smorzamento ( $C$ ) dei rispettivi elementi di sospensione, le reazioni di questi elementi di sospensione ( $P$ ) e le forze di contatto ruota-rotaia ( $R$ ).

$\alpha(x)$ ,  $\delta(x)$  e  $\gamma(x)$  sono le funzioni di controllo e sono fattori adimensionali. Moltiplicando questi fattori per un determinato valore iniziale, è possibile ottenere proprietà variabili della struttura. Esse non sono assegnate, ma devono essere determinate attraverso il processo di ottimizzazione mediante l'uso di diversi criteri. È importante notare che i relativi intervalli di variabilità sono limitati dalle caratteristiche tecnologiche. La teoria del controllo ottimale prevede il limite alle vibrazioni del ponte, del binario e del veicolo mediante equazioni e nelle equazioni per i parametri di interazione (ad es. accelerazione, forze, spostamento, ecc.). L'equazione di limite appare come una equazione differenziale alle derivate parziali per la vibrazione della campata del ponte, nella quale la parte destra rappresenta la sollecitazione dinamica dalla rotaia che si basa sullo smorzamento e sulle reazioni di deformazione elastica:

$$E_b J_o \frac{\partial^2}{\partial x_b^2} \left( \alpha^4(x_b) \frac{\partial^2 y_b}{\partial x_b^2} \right) + \alpha^2(x_b) \rho F_0 \frac{\partial^2 y_b}{\partial t^2} + c \frac{\partial y_b}{\partial t} = \dots \\ \dots c_p \left( \frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_b}{\partial t} \right) + \gamma(x) \delta(x) U'(y_p - y_b) \quad (1)$$

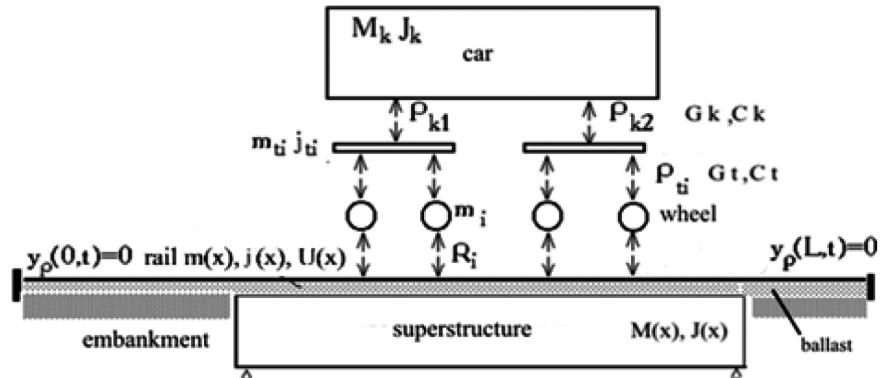


Fig. 1 - Il modello BTCS.  
Fig. 1 - BTCS model.

function as well.  $J(x)$  can be varied by the same  $\alpha(x)$  function as pointed out in the equation (1).

- The vertical displacement of the rail  $y(x,t)$ , that depends on the  $x$ -coordinate and time, starting/boundary conditions  $y(0,t)$ ,  $y(L,t)$ , and vertical displacement of the bridge superstructure  $y_b(x,t)$ . These displacements allow calculating all the necessary parameters to estimate the behaviour of the BTCS: the bending moment, rail bed loading, etc.
- $G_k$ ,  $C_k$ ,  $G_v$ ,  $C_v$ ,  $P_{ti}$ ,  $R_i$  denote the stiffness ( $G$ ) and damping ( $C$ ) of respective suspension elements, the forces in these suspension elements ( $P$ ), the rail-wheel contact forces ( $R$ ).

$\alpha(x)$ ,  $\delta(x)$  and  $\gamma(x)$  are controlling functions, which are dimensionless factors. We can achieve variable properties of the structure by multiplying these factors by a certain starting value. They are not assigned, but have to be found through optimisation by means of different criteria. It is important to note that the ranges of their variations are limited by the technological possibilities.

The optimal control theory envisages limitation of the bridge, rail and car vibrations by means of equations and in equations for interaction parameters (e.g. acceleration, forces, displacement, etc.). The equation limitation looks like a partial differential equation of the bridge beam vibration, where the right part means the dynamic load from the rail that consists of the dissipation and elastic deformation reacting force:

$$E_b J_o \frac{\partial^2}{\partial x_b^2} \left( \alpha^4(x_b) \frac{\partial^2 y_b}{\partial x_b^2} \right) + \alpha^2(x_b) \rho F_0 \frac{\partial^2 y_b}{\partial t^2} + c \frac{\partial y_b}{\partial t} = \dots \\ \dots c_p \left( \frac{\partial y_p}{\partial t} - \frac{\partial y_b}{\partial t} \right) + \gamma(x) \delta(x) U'(y_p - y_b) \quad (1)$$

In (1)  $J_o$  and  $F_0$  mean the moment of inertia and section area constant initial value,  $\rho$  is the density,  $c$  is the dissipation parameter,  $x_b$  the local coordinate on the beam length,  $y_b$ ,  $y_p$  the beam and rail displacement. Similarly, the track

In (1)  $J_0$  e  $F_0$  rappresentano il valore costante iniziale del momento di inerzia e dell'area della sezione trasversale,  $\rho$  è la densità,  $c$  è il parametro di smorzamento,  $x_b$  è la coordinata locale condotta sulla lunghezza della campata,  $y_b$ ,  $y_p$  sono gli spostamenti di campata e di rotaia. Allo stesso modo, l'equazione è usata per le vibrazioni del binario [2]. Le vibrazioni dei veicoli possono essere rappresentate da equazioni differenziali ordinarie [5]. È possibile anche introdurre equazioni limite per alcuni parametri, sul momento flettente per esempio, sullo spostamento verticale dell'impalcato, ecc. Lo schema rappresentato nella fig. 1 è ben noto, ma le differenze riguardano i fattori variabili e il modello matematico vibrazionale (1).

La soluzione delle equazioni vibrazionali è stata trovata mediante il cosiddetto metodo alle differenze finite e l'utilizzo della procedura esplicita di Eulero, che consente un intervallo di integrazione molto piccolo (0.0001 s) per raggiungere la stabilità del processo computazionale. Pertanto questo schema permette il l'analisi modale per frequenze di vibrazione fino a 5 kHz.

Le equazioni limite sono necessarie per mantenere la forza minima verticale  $R_{\min}$  del contatto ruota-rotaia che impedisce il deragliamento e l'accelerazione verticale di cassa  $W_{\lim}$  indirizzata all'ottenimento delle necessarie caratteristiche di comfort [4]:

$$R_{\min} > R_{\lim} \quad (2)$$

$$W_{\max} < W_{\lim} \quad (3)$$

A parere degli autori, questi limiti sono molto restrittivi e devono essere soddisfatti in ogni caso. Il limite sulla sicurezza di marcia è analizzato con la minima forza verticale in qualsiasi contatto ruota-rotaia mentre il veicolo è in moto lungo la zona del ponte nel tempo  $T$ . Questo significa che la forza deve essere maggiore di  $R_{\lim}$  in qualsiasi istante. La condizione di sicurezza è descritta in dettaglio a seguire.

La stabilità del moto della ruota sulla una rotaia dipende dal rapporto tra le forze verticali e trasversali nel generico contatto ruota-rotaia. Tale rapporto è stato determinato [6] per diversi casi. In [6] si trova stabilito il rapporto tra forze verticali e laterali estreme nel contatto ruota-rotaia. Quindi è possibile stimare il valore minimo ammissibile della forza verticale  $R_{\min}$  che impedisce il deragliamento ipotizzando che la forza laterale è al suo valore massimo in ogni istante. Per quanto esposto, in conclusione, si trova  $R_{\min} = 23.8kN$  [2].

Il limite sul comfort è legato all'accelerazione di ogni cassa, in composizione al convoglio, considerando i modi di vibrazione del beccheggio e sussulto. L'Euronorma [7] stabilisce un ottimo livello di comfort se l'accelerazione è inferiore a  $1 m/s^2$ . Gli autori stimano che, in caso di impalcato a campate multiple, si dovrebbe ottenere un buon livello. Inoltre, si sono introdotte alcuni limiti tecnologici insiti nelle funzioni  $\alpha(x)$ ,  $\delta(x)$  e  $\gamma(x)$  poiché non è possibile modificare i parametri della struttura in una gamma illimitata.

vibration equation was used [2]. Vibrations of the cars may be presented by ordinary differential equations [5]. We can also introduce limit equations for some parameters, bending moment for instance, bridge deck vertical displacement, etc. The scheme in fig. 1 is well known, but the differences concern the variable factors and mathematical vibration model (1).

The solution of the vibration equations was found using the so-called finite-difference method and the Euler explicit scheme which assumes a very small time step (0.0001s) to achieve the stability of the computational process. So this scheme allows modal analysis for vibration frequencies up to 5 kHz.

Equation limitations are necessary to limit the minimum vertical force  $R_{\min}$  in wheel-rail contact that prevents derailment and vertical acceleration of car bodies  $W_{\lim}$  to obtain comfort [4]:

$$R_{\min} > R_{\lim} \quad (2)$$

$$W_{\max} < W_{\lim} \quad (3)$$

These limitations, in our opinion, are very restrictive and must be satisfied in any case. Safety limitation is analysed with the minimum vertical force in any wheel-rail contact while a train is moving along a bridge zone during  $T$  time. It means the force has to be greater than  $R_{\lim}$  at any time. The safety condition will be discussed in detail below.

The stability of a wheel motion on a rail depends on the ratio between vertical and lateral forces in a wheel-rail rolling contact. The ratio has been determined for different cases [6]. In [6] the extreme vertical and lateral forces ratio in wheel-rail contact was established. Therefore, we can estimate the minimal permissible value of the vertical force  $R_{\min}$  that prevents derailment assuming that the lateral force is the maximal at that moment. According to our conclusion  $R_{\min}=23.8kN$  [2].

Comfort limitation is connected with the acceleration of any car body of a train, considering pitching and bouncing. The Eurocode [7] establishes a very good level of comfort if acceleration is less than  $1 m/s^2$ . We believe, that in case of the multi-span flyover a good level should be obtained. Besides, some technological limitations were introduced dealing with the  $\alpha(x)$ ,  $\delta(x)$  and  $\gamma(x)$  functions because the structure parameters cannot be changed in an unlimited range.

The model was validated the doctorate dissertation [5] by replicating exact solutions to similar problems by different authors.

### 3. Optimisation criteria

There are two groups of criteria [8]. The first group of criteria D1 is created to estimate the beam quality, the second group D2 evaluates track quality. D1 group consists of:

- the first criterion requires minimum of the bridge beam mass;

Il modello è stato validato sulla tesi di dottorato [5] replicando soluzioni precise a problemi simili, sviluppate da parte di autori diversi.

### 3. I criteri di ottimizzazione

Ci sono due gruppi di criteri [8]. Il primo gruppo di criteri, D1, viene creato per la stima della qualità della campata; il secondo gruppo, D2, valuta la qualità del binario. Il gruppo D1 è costituito da:

- un primo criterio, che richiede il minimo della massa per la campata del ponte;
- un secondo criterio, che impone il valore minimo di rigidezza della campata;
- un terzo criterio, che rappresenta il valore minimo di momento flettente nella campata del ponte;
- un quarto criterio, che indica il valore minimo della sollecitazione di taglio.

L'ottimizzazione dell'interazione dinamica veicolo-binario è stata eseguita secondo diversi criteri (gruppo D2):

- sollecitazione minima media sull'armamento ferroviario;
- minima velocità relativa delle traverse, che produce dissipazione di energia nella massicciata;
- minima irregolarità della sollecitazione sull'armamento ferroviario, che provoca variazioni nel profilo della linea (5).

Il terzo criterio del gruppo D2 è più efficace perché unisce i due criteri precedenti. Esso richiede la minima variabilità della sollecitazione sull'armamento ferroviario intorno al valore predeterminato Q, dove Q indica la sollecitazione tra la rotaia e gli organi di attacco in corrispondenza della coordinata di contatto della ruota (5). È possibile impostare il valore di Q per ridurre la sollecitazione sull'armamento ferroviario, processo che equivale ad impostare le condizioni del primo criterio. Tuttavia, il terzo criterio rende inoltre la sollecitazione sull'armamento ferroviario più uniforme e diminuisce la probabilità di irregolarità del profilo. Tutti i criteri menzionati agiscono sullo spazio L e per tempo T di transito del veicolo nella zona ponte, inclusi gli spazi di transizione in ingresso e in uscita. L'applicazione dei criteri è descritta in dettaglio nel seguito.

### 4. Le vibrazioni della sovrastruttura del ponte

Le sovrastrutture del ponte sono gli elementi principali che influenzano il comportamento dinamico del sistema di trasporto (BTCS). La fig. 2 mostra lo spostamento previsto numericamente del centro di una sovrastruttura molto rigida quando sei veicoli ferroviari transitano alla velocità di 400 km/h. In questo caso e successivamente, sarà considerato per lo più il convoglio previsto per la ferrovia russa (basato sulla architettura del Sie-

- the second criterion requires the minimum of beam rigidity;
- the third one is the minimum of the bending moment in the bridge beam;
- the fourth one is the shear force minimum.

The optimisation of the car-track dynamic interaction was performed according to several criteria (D2 group):

- minimal average load on the rail bed;
- minimal relative speed of the sleepers, that produces dissipation of energy in the ballast;
- minimal irregularity of the load on the rail bed, that causes deviation of the railway profile (5).

The third criterion of D2 group is most effective because it combines the two previous criteria. It demands minimum volatility of the load on the rail bed around the predetermined the Q value, where Q means the force between the rail and the rail fastening just under the wheel (5). We can set the Q value to reduce the load on the rail bed that means setting the same conditions as the first criterion. However, the third criterion additionally makes the load on the rail bed more uniform and decreases the probability of profile irregularities. All the mentioned criteria act on the L space of the bridge zone and for T time while a train is passing the bridge zone including transitions. The application of the criteria will be discussed in detail below.

### 4. Bridge superstructure vibrations

Bridge superstructures are the main elements that influence the dynamic behaviour of the carrier system (BTCS). Fig. 2 shows the numerically predicted displacement of the centre of a very rigid superstructure when six train wagons are passing it at the speed of 400 km/h. In this case and later, the perspective train for Russian railroad (based on Siemens Velaro) is mostly considered. We can see the steady-state vibration after the second wagon passing. However the vibration of the less rigid superstructure is continuously increasing under the same train up to the sixth wagon (fig. 3) that means near-resonance vibration. As we can see later, in some cases track optimisation cannot be successful just because of the unsuitable dynamic properties of the superstructure.

The case of spoiled and sodden ballast is probably the worst situation, because the mass of the bridge superstructure is greater than that of a clean and dry ballast. A spoiled ballast decreases the natural frequency of the beam and brings it closer to its resonance.

Of course, different trains produce different vibrations of the superstructures and it would be unreasonable to optimize the system for a certain train. The optimisation of the system for the train producing the most significant vibration leads to an optimal solution for any other train. This was checked for different high-speed trains, but unfortunately the topic would require a broader discussion than this paper allows.

mens Velaro). È possibile notare le vibrazioni stazionarie dopo il transito del secondo veicolo. Tuttavia la vibrazione della sovrastruttura, meno rigida, è in continuo aumento sotto lo stesso convoglio e fino al transito del sesto veicolo (fig. 3), fenomeno questo che indica una vibrazione nell'intorno della condizione di risonanza. Come è esposto a seguire, in alcuni casi l'ottimizzazione del binario non conduce a risultati soddisfacenti proprio a causa delle proprietà dinamiche inadatte della sovrastruttura.

Il caso di massicciata contaminata ed allagata è probabilmente la situazione peggiore, perché la massa della sovrastruttura del ponte è maggiore rispetto ad una massicciata risanata ed asciutta. La massicciata contaminata diminuisce la frequenza naturale della campata e la avvicina alla sua risonanza.

Naturalmente, transiti di convogli diversi creano vibrazioni diverse delle sovrastrutture e sarebbe irragionevole ottimizzare il sistema per un unico tipo di convoglio. L'ottimizzazione del sistema per il convoglio che genera la vibrazione più significativa conduce ad una soluzione ottima per qualunque altra tipologia di convoglio. Questa affermazione è stata verificata per diversi convogli ad alta velocità, ma l'argomento esigerebbe una trattazione più ampia di quella sviluppabile in questa memoria.

### 5. L'ottimizzazione della sovrastruttura del ponte

Il primo fattore da analizzare è l'efficienza costruttiva della campata. Il criterio (4) spinge a minimizzare l'energia potenziale dovuta alla inflessione ed al momento flettente della sovrastruttura del ponte durante le vibrazioni forzate. Questo conduce all'allontanamento della vibrazione dall'intorno delle frequenze di risonanza durante l'ottimizzazione. È appropriata in questo caso un'osservazione: l'uso della frequenza naturale per la stima della qualità del BTCS non è sempre corretto, poiché l'algoritmo matematico della stima della frequenza naturale non tiene conto delle masse del materiale rotabile. È credibile che l'ottimizzazione dell'intero sistema di trasporto (BTCS) sia più precisa:

$$\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \int_{t_{0k}}^{t_{0k}+t_k} E_b J_0 \alpha^4(x_k) \left( \frac{\partial^2 y_k}{\partial x_k^2} \right)^2 dx_k dt \rightarrow \min \quad (4)$$

dove  $k$  è il numero di campata nell'impalcato. La tabella 1 mostra l'ottimizzazione della sovrastruttura secondo il criterio (4). La seconda colonna della tab. 1 rappresenta le caratteristiche iniziali delle campate. Il parametro  $f_1$  indica la prima frequenza naturale di vibrazione,  $M_0$  è il

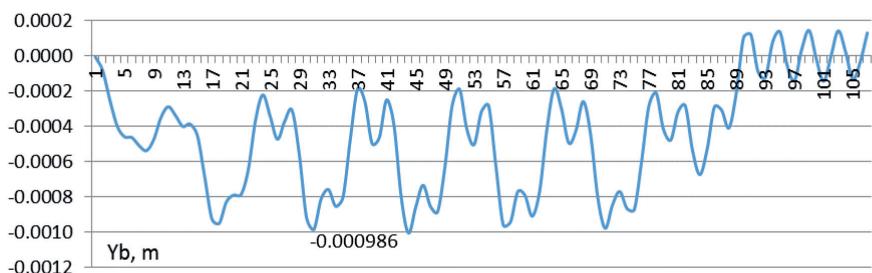


Fig. 2 - Vibrazione della sovrastruttura con massicciata contaminata e allagata.  
Fig. 2 - Vibration of superstructure with spoiled and sodden ballast.

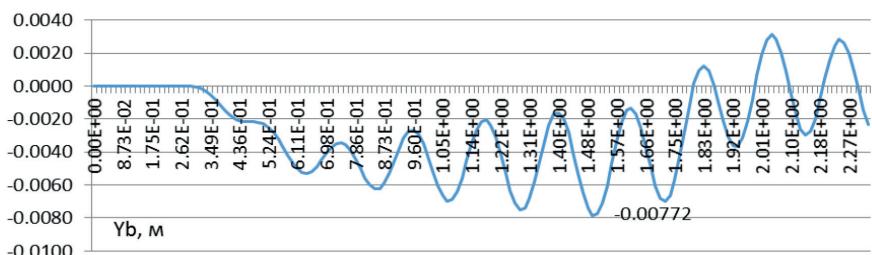


Fig. 3 - Vibrazione della sovrastruttura meno rigida con massicciata contaminata ed allagata.  
Fig. 3 - Vibration of less rigid superstructure with spoiled and sodden ballast.

### 5. Bridge superstructure optimisation

The first factor to be discussed is the material efficiency of the beam. The (4) criterion means the urge to minimize the potential energy of the bending deformation and bending moment of the bridge superstructure during forced vibrations. This leads to moving away from the near resonance vibration during optimisation. Here an appropriate remark should be made: using natural frequency to estimate the BTCS quality is not always correct because the mathematical algorithm of natural frequency estimation does not take into account the rolling stock masses. We believe that the optimisation of the whole carrier system (BTCS) is more exact.

$$\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \int_{t_{0k}}^{t_{0k}+t_k} E_b J_0 \alpha^4(x_k) \left( \frac{\partial^2 y_k}{\partial x_k^2} \right)^2 dx_k dt \rightarrow \min \quad (4)$$

where  $k$  is the number of a beam in the flyover. Table 1 shows the superstructure optimisation according to criterion (4). The second column in table 1 presents the starting features of beams. The parameter  $f_1$  means the first natural mode frequency,  $M_0$  stands for moment on the first iteration,  $M_n$  shows the values on the last iteration. We can see a 25% reduction of the bending moment in the best case (#1) and more than 5 times in the worst case of dynamic parameters mismatch that causes near-resonance vibration of the bridge beam (#4 and #5). The essential decrease of the bending moment means the increase of material efficiency and allows avoiding resonance of the BTCS. The strength of the bridge superstructure could be obtained even if resonance occurs but in this case, wheel motion sta-

momento flettente relativo alla prima iterazione,  $M_n$  evidenzia i valori dell'ultima iterazione. Possiamo osservare una riduzione del 25% del momento flettente nel caso migliore (#1) e più di 5 volte nel caso peggiore di mancata corrispondenza di parametri dinamici, evidenza che provoca vibrazioni in condizioni prossime alla risonanza della campata del ponte (#4 e #5). L'importante diminuzione del momento flettente indica l'aumento di efficienza costruttiva e consente di evitare la risonanza del BTCS. La resistenza della sovrastruttura del ponte potrebbe essere ottenuta anche in condizioni di risonanza, ma in questo caso, comfort e stabilità di marcia della ruota non sarebbero garantiti, come è esposto nel seguito. Per questo è preferibile evitare la risonanza della sovrastruttura del ponte.

È necessario sottolineare che nei casi #1 ÷ #5 è possibile ottenere un'unica soluzione del problema di ottimizzazione per diverse condizioni iniziali ( $f_1$  e  $M_0$ ); per altri casi è impossibile raggiungere la stessa condizione estremante e, per i casi #6 e #7, esiste un altro valore estremante del criterio (4).

Un altro criterio di ottimizzazione è il criterio di massa:

$$\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \alpha^2(x_k) \rho F_0 dx_k \rightarrow \min \quad (5)$$

Nella fig. 4 appare il risultato dell'ottimizzazione: sull'asse verticale è indicata la massa per metro di progressiva, mentre sull'asse orizzontale è riportato il numero di sezione trasversale. La linea rossa è la funzione di massa sulla prima iterazione di ottimizzazione, quella verde è la funzione di massa dopo l'ottimizzazione. La massa totale della sovrastruttura del ponte prima dell'ottimizzazione è 1,8 kt e dopo l'ottimizzazione diviene 1,5 kt. Questo implica una riduzione della massa totale dopo l'ottimizzazione del 15% (pari a 300 t). La funzione di rigidità della campata cambia allo stesso modo. Nelle sezioni finali (#1 e #11), in linea generale, la funzione  $\alpha$  potrebbe attribuirsi qualunque volume perché queste sezioni hanno un'influenza bassa sul comportamento dinamico della campata, cosicché si potrebbero scegliere i loro parametri secondo altre requisiti (sollecitazione di taglio, ecc.).

La fig. 5 dimostra come l'ottimizzazione viene eseguita nel caso di un ponte a due campate. La linea blu è la funzione dopo la prima iterazione ed è uguale a 1 all'inizio. La linea viola indica la funzione alla iterazione numero 40. La variazione accettabile della funzione è del 10% del valore iniziale, pari ad 1, ed è evidente che nel diagramma della fig. 5 non vi è alcuna traccia che violi il limite di 0.9. La progettazione illustra l'accettazione di questa variazione.

TABELLA 1 – TABLE 1  
Ottimizzazione sovrastruttura secondo il criterio del momento flettente  
*Superstructure optimization according to the bending moment*

Caso - Case	$f_1$	$M_0$	$M_n$
Numero - Number	Hz	$10^6 \text{ Nm}$	$10^6 \text{ Nm}$
1	3,82	2,25	1,68
2	4,04	2,68	1,69
3	4,23	3,31	1,68
4	4,80	9,71	1,69
5	4,92	9,82	1,67
6	5,32	5,15	2,43
7	5,04	3,80	2,42

*ability and comfort are not guaranteed as we can see later. That is why it is desirable to avoid the resonance of the bridge superstructure.*

*It is necessary to underline that in cases #1 - #5 we can obtain the only solution to the optimisation problem for different initial conditions ( $f_1$  and  $M_0$ ); for other cases it is impossible to reach the same extremum and for cases ##6,7 there is another extremum for criterion (4).*

*Another optimisation criterion is the mass criterion:*

$$\sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \alpha^2(x_k) \rho F_0 dx_k \rightarrow \min \quad (5)$$

*In fig. 4 the result of optimisation is shown: the vertical axis means the mass per running metre, the horizontal axis is the cross section number. The red line is the mass function on the first iteration of optimisation, the green one is the mass function after optimisation. The total mass of the bridge superstructure before optimisation was 1.8 kt and after optimisation it becomes 1.5 kt. This means a total mass decrease after optimisation by 15% or 300 t. The beam stiffness function changes similarly. In the end sections (#1 and #11) generally speaking the  $\alpha$ -function may have whichever*

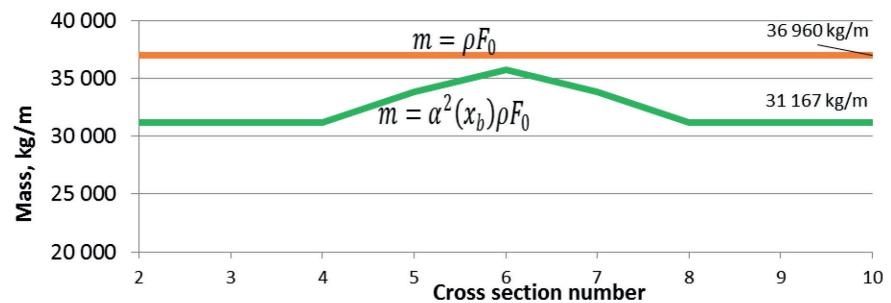


Fig. 4 - Ottimizzazione della sovrastruttura secondo il criterio di massa (5).  
*Fig. 4 - Superstructure optimisation according to the mass criterion.*

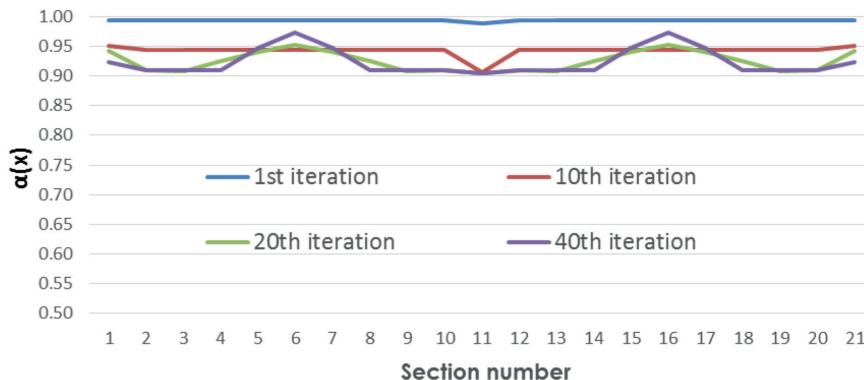


Fig. 5 - Evoluzione della funzione di controllo  $\alpha(x)$  durante l'ottimizzazione di un ponte a due campate.

*Fig. 5 - Evolution of the  $\alpha(x)$  controlling function during a two span bridge optimisation.*

Il risultato dell'ottimizzazione della campata del ponte è la riduzione della massa e dello spessore della campata alle sue estremità. La riduzione causa un problema di resistenza poiché il comportamento della campata può cambiare in seguito all'ottimizzazione.

Esiste un'interessante collegamento tra due criteri in conflitto: il minimo del momento flettente e la massa della campata. Nella fig. 6 è possibile vedere l'evoluzione del massimo momento flettente indotto dal transito di un convoglio durante l'ottimizzazione. All'inizio, questo parametro cresce fino al 4% del valore iniziale per la decima iterazione, mentre la massa della trave sostanzialmente diminuisce (fig. 5, linea rossa). Quindi il momento diminuisce dell'1% del valore iniziale (la fig. 5 mostra che la funzione di controllo  $\alpha(x)$  sta aumentando nel mezzo delle campate dopo la decima iterazione) ed alla fine si stabilizza vicino al valore impostato originariamente. Questo significa che è possibile fissare il valore del momento durante il decremento del valore della massa per ottenere resistenza della campata, nonostante la riduzione della sua massa. Questa impostazione è implementata mediante una equazione limite sul valore del massimo momento flettente. È possibile ridurre il massimo momento flettente causato dall'ottimizzazione mediante questa equazione limite, ma la riduzione di massa può essere meno efficace perché il criterio di massa (5) e il criterio del momento flettente (4) sono in conflitto. Questo problema richiede una soluzione di ottimizzazione di Pareto come è descritto nel dettaglio in [10]. Quindi, si può concludere che la riduzione di massa e di rigidezza della sovrastruttura del ponte può influenzare in modo insignificante il comportamento della campata se è realizzata secondo i principi di otti-

volume because these sections have a low influence on the dynamic behaviour of the beam, so their parameters could be chosen according to other demands (cutting force, etc.).

Fig. 5 shows how optimisation runs in case of a two span bridge. The blue line is the  $\alpha$ -function after the first iteration and it is equal to 1 at the beginning. The purple line shows the  $\alpha$ -function on iteration number 40. The acceptable deviation of the  $\alpha$ -function is 10% of the starting value equal to 1 and it is evident that no line in the fig. 5 violates this limitation of 0.9. The designing shows the acceptance of this deviation.

The result of the bridge beam optimisation is the reduction of the mass and height of the beam at its ends. The reduction causes the strength problem because the beam behaviour may be changed after optimisation.

There is an interesting connection between two conflicting criteria: the minimum of the bending moment and mass of the beam. In fig. 6 we can see the evolution of the maximum bending moment from a moving train during optimisation. At the beginning, it rises on the tenth iteration up to 4% of the primary value, while the beam mass is essentially decreasing (fig. 5, red line). Then the moment decreases by 1% of the primary value (fig. 5 shows that the  $\alpha(x)$  controlling function is rising in the middle of the spans after the tenth iteration), and finally, it stabilizes near the primarily set value. This means we can fix the moment value during mass decrease to obtain the strength of the beam despite of its mass reduction. The setting is implemented by means of an equation limitation on the maximum bending moment. It is possible to reduce the maximum bending moment resulting from optimisation by means of this equation limitation but the mass reduction may be less effective because the mass criterion (5) and bending moment criterion (4) are in conflict. This problem requires the Pareto optimisation solution and is discussed in detail in [10].

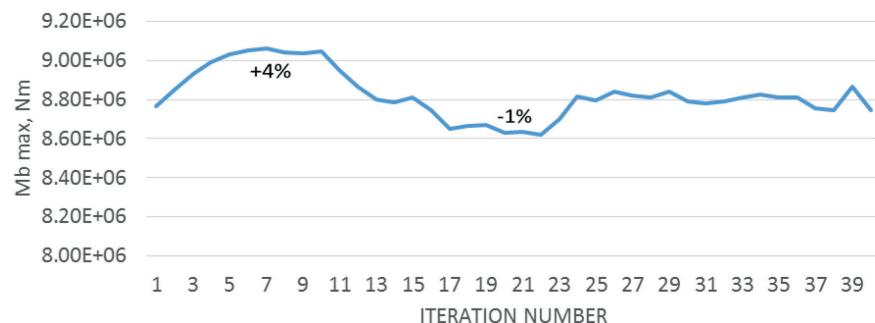


Fig. 6 - Valore massimo dell'evoluzione del momento flettente durante l'ottimizzazione. È applicata l'equazione limite sul momento flettente.

*Fig. 6 - Maximum value of the bending moment evolution during optimisation. Equation limitation on the bending moment is applied.*

mizzazione BTCS riguardo al cambiamento coordinato di massa e rigidezza, così come influenzato dalla funzione di controllo  $\alpha(x)$  e come appare in (1).

In fig. 7 è mostrato il processo di ottimizzazione, secondo il criterio (5). L'ottimizzazione è stata effettuata con l'equazione limite sul massimo spostamento  $y$  della campata.

Nella fig. 7:

- $D$  è indice del criterio (5) che è proporzionale al criterio del volume senza parte esponenziale,
- $u$  è il volume della funzione in diverse sezioni trasversali (#1 è la sezione del piedritto, #3 è la sezione di metà della campata simmetrica),
- $y$  è lo spostamento della sezione trasversale centrale.

La seconda iterazione dimostra la notevole diminuzione del criterio di massa (5), ma il limite  $y = 0,5$  cm viene violato. Le seguenti iterazioni rendono il criterio (5) leggermente peggiorativo con la terza iterazione, perché il vincolo di uguaglianza è molto forte e deve essere soddisfatto in ogni caso.

## 6. L'ottimizzazione della durata del binario

La durata del binario su massicciata è il secondo fattore menzionato nell'introduzione. La fig. 8 mostra le dimensioni degli scostamenti sotto le traverse nelle zone di transizione misurate sul ponte reale (il binario sul ponte tra due traverse "0" non viene mostrato). Prima del binario senza massicciata sul ponte, gli scostamenti aumentano in maniera monotona (nel senso dei numeri positivi delle traverse), a causa della rarefazione della massicciata nella zona di transizione mentre gli scostamenti hanno un carattere oscillante dopo il ponte (nel senso dei numeri negativi), a causa di una vibrazione del veicolo provocata dalla inflessione verticale della campata. La sovrasollecitazione sulla massicciata prodotto dalla vibrazione dei veicoli conduce alla rarefazione della massicciata e ad irregolarità nel profilo della linea. La simulazione al computer conferma la sovrasollecitazione sulla massicciata dopo il ponte (fig. 9). Pertanto, la distribuzione uniforme della sollecitazione sulla sede ferroviaria è importante per la durata del binario.

Si consideri l'ottimizzazione dell'interazione dinamica di veicoli e binario all'interno della zona del ponte utilizzando il terzo criterio di D2:

$$D = \int_L \int_T (\gamma(x) \delta(x) U'(y_p - y_b) - Q)^2 dx dt \rightarrow \min \quad (6)$$

Contemporaneamente cerchiamo di massimizzare  $R_{\min}$  mentre il convoglio sta transitando su una porzione

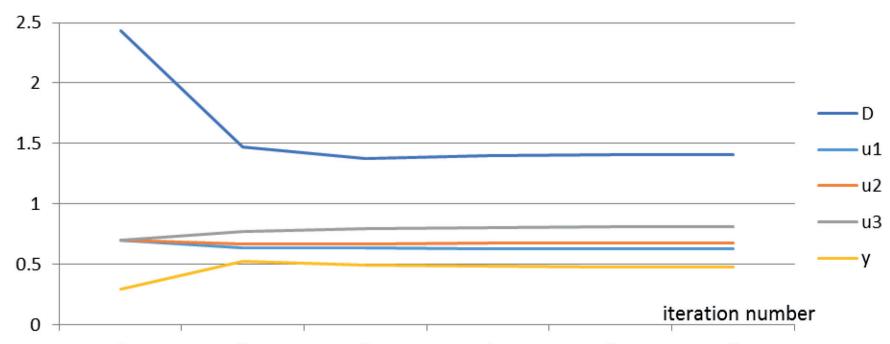


Fig. 7 - Processo di ottimizzazione per criterio di minimo di massa. È applicata l'equazione limite sul massimo spostamento della campata  $y = 0,5$  cm.

Fig. 7 - Optimisation process by criterion of the mass minimum. Equation limitation on beam displacement  $y = 0.5$  cm is applied.

Thus, we can conclude that the mass and rigidity reduction of the bridge superstructure can insignificantly influence the beam behaviour if it is implemented according to BTCS optimisation principles concerning coordinated change of the mass and rigidity, as affected by the  $\alpha(x)$  controlling function as it appears in (1).

Fig. 7 shows the optimisation process, according to criterion (5). The optimisation was performed with the equation limitation on the maximum beam displacement  $y$ .

In fig. 7:

- $D$  represents the criterion (5) index that is proportional to the criterion volume without exponential part,
- $u$  is the  $\alpha$ -function volume in the different cross sections (#1 is the abutment section, #3 is in the middle of the symmetric beam),
- $y$  is the displacement of the middle cross section.

The second iteration shows the remarkable decrease of the mass criterion (5), but limitation  $y = 0.5$  cm is violated. The following iterations make the criterion (5) a little bit worse in comparison with the third iteration, because the equality constraint is very strong and must be satisfied in any case.

## 6. Track durability optimisation

Durability of the ballasted track was the second factor that was mentioned in the introduction. Fig. 8 shows the gap sizes of under sleepers in the transition zones measured at the real bridge (the track on the bridge between two "0" sleepers is not shown). In front of the non-ballasted track on the bridge the gaps monotonically rise (positive numbers of the sleepers), because of the ballast draft in the transition zone while the gaps have an oscillating character behind the bridge (negative numbers), due to a car vibration caused by vertical beam deflection. Ballast overloading caused by cars vibration leads to ballast draft and profile irregularities. Computer simulation confirms ballast overloading after the bridge (fig. 9). Therefore, even distribution of the load on the rail bed is important for track durability.

$L$  di ponte, comprendente le zone di transizione nel tempo  $T$ , dove  $L$  è la lunghezza totale del ponte comprensiva delle zone di transizione e  $T$  è il tempo totale di moto del convoglio sulla zona ponte.

Nella fig. 10 l'asse verticale indica la sollecitazione verticale sull'armamento ferroviario (organi di attacco) in corrispondenza del contatto di una ruota in moto, l'asse orizzontale indica il tempo. Le linee verticali indicano l'inizio e la fine del ponte.

Si può osservare la riduzione della sovrasollecitazione locale sulla massicciata utilizzando le funzioni di controllo del binario che sono correlate alla rigidezza dell'armamento ferroviario, dovuta alle solette sotto-traversa e al passo di posa delle stesse traverse. Tali funzioni sono state discusse in dettaglio in [8]. La sollecitazione sull'armamento ferroviario dopo l'ottimizzazione, indicata con la traccia in grassetto, appare molto più contenuta se confrontata con la traccia sottile indicante la condizione antecedente all'ottimizzazione. Il terzo criterio consente di ridurre di due volte il valore della deviazione standard della sollecitazione sull'armamento ferroviario nella condizione di transito di un convoglio ad elevata numerosità di veicoli, da 2.8kN a 1.4kN (fig. 11). Inoltre, diminuisce il valore massimo della sollecitazione da 40kN a 30,7kN (fig. 11). Dopo l'ottimizzazione, il valore massimo della sollecitazione è inferiore al valore critico di 31kN. Tale evidenza è molto importante perché una sollecitazione superiore a quella critica provoca la deformazione plastica nell'armamento ferroviario. Questo ri-

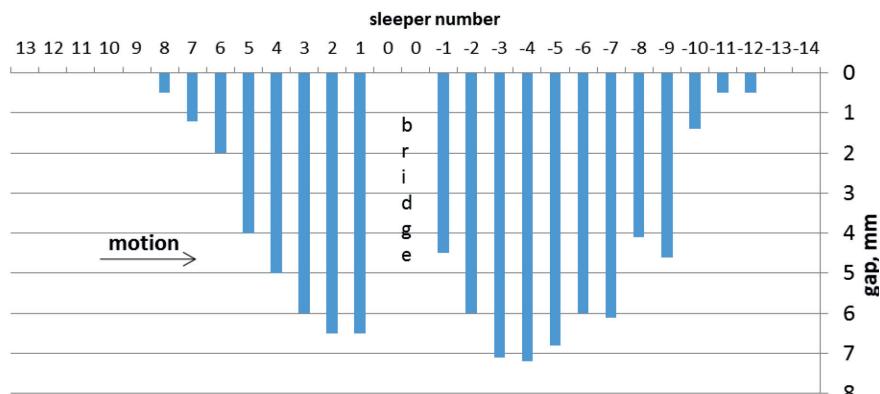


Fig. 8 - Entità degli scostamenti sotto le traverse nelle zone di transizione.  
Non è evidenziato il binario sul ponte.

Fig. 8 - Gap sizes under sleepers in the transition zones. The track on the bridge is not shown.

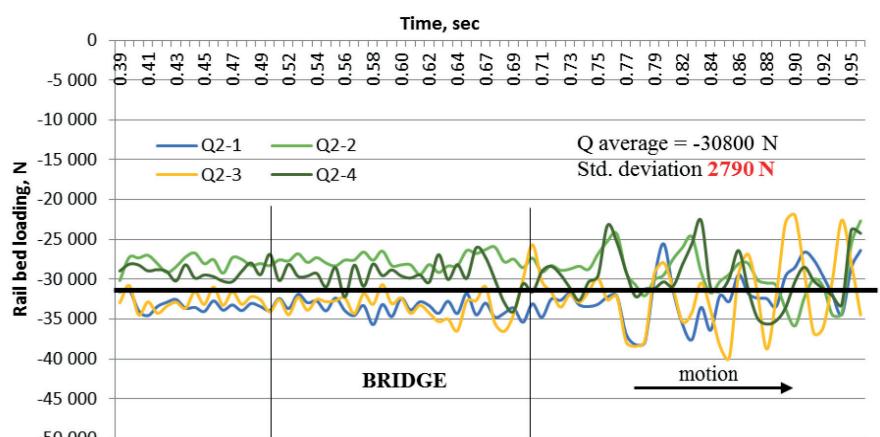


Fig. 9 - Sovrasollecitazione locale sulla massicciata prima dell'ottimizzazione [8].  
Fig. 9 - Ballast local overload before optimisation [8].

Let us consider the optimisation of the dynamic interaction of cars and track inside the bridge zone using the third criterion of D2:

$$D = \int_L \int_T (\gamma(x)\delta(x)U'(y_p - y_b) - Q)^2 dx dt \rightarrow \min \quad (6)$$

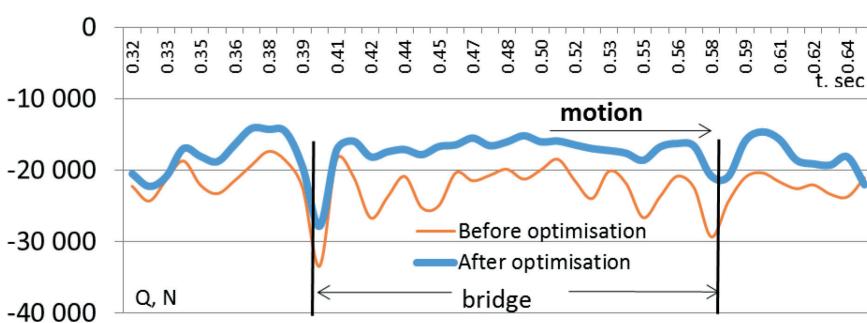


Fig. 10 - Riduzione della sovrasollecitazione locale sulla massicciata mediante le funzioni di controllo del binario (un esempio).

Fig. 10 - Decrease of the ballast local overload by means of the track controlling functions (an example).

Simultaneously we will try to maximize  $R_{\min}$  while the train is passing a bridge zone  $L$  including transition zones during time  $T$ , where  $L$  is the overall length of the bridge zone including transition zones and  $T$  is the total time of the train motion through the bridge zone.

In fig. 10 the vertical axis represents the vertical load on the rail bed (fastening) just under a moving wheel, the horizontal axis means time. The vertical lines mark the beginning and the end of the bridge.

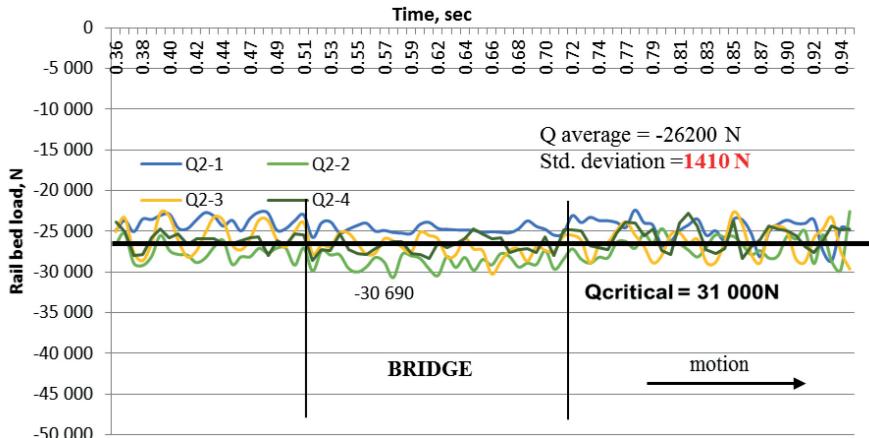


Fig. 11 - Sovrasollecitazione locale sulla massicciata dopo l'ottimizzazione [8].  
Fig. 11 - Ballast local overload after optimisation [8].

sultato è stato raggiunto cambiando il valore di  $Q$  nell'espressione (6).

## 7. Le forze di contatto ruota-rotaia e deraglimento

La sicurezza è il terzo fattore nominato nell'introduzione. La fig. 12 mostra il risultato della simulazione del convoglio Siemens che transita alla velocità di 400 km/h prima dell'ottimizzazione. Il diagramma mostra la forza di contatto ruota-rotaia per quattro ruote del secondo veicolo. Nel grafico e nel seguito, il valore del tempo è riferito alla prima ruota del veicolo.

I diagrammi delle altre ruote sono stati traslati per segnare gli estremi del ponte. Si consideri il secondo veicolo perché la vibrazione della sovrastruttura del ponte raggiunge la stabilità dopo il transito del primo veicolo e l'ampiezza della vibrazione della sovrastruttura non aumenta durante il transito del convoglio (fig. 2). Possiamo vedere la pericolosa diminuzione delle forze a valle del ponte allorché la forza di contatto scende al di sotto del livello di pericolo di 23,8kN [2] o addirittura si annulla. Questo non implica una condizione di imminente deragliamento perché ciò accadrà nel caso di contemporaneo sviluppo della massima forza di contatto trasversale (che non dipende dai parametri in discussione), ma è una situazione pericolosa ed è importante evitarla. La probabilità di sollevamento di una ruota esiste ed è stata analizzata nel dettaglio in [9].

La fig. 13 dimostra il risultato dell'ottimizzazione secondo il criterio (6) ed il limite (2) - le forze di contatto verticali ruota-rotaia rimangono oltre  $R_{lim} = 23,8kN$  mentre il treno sta transitando sul ponte e la forza mini-

We can see the decrease of the ballast local overload by using the track controlling functions that are connected with rail bed stiffness due to under sleeper pads and sleeper spacing. These functions were discussed in detail in [8]. The load on the rail bed after optimisation, shown with the bold line, looks much smoother than the thin line before optimisation. The third criterion allows decreasing the standard deviation of load on the rail bed twice in the situation with the multicar train, from 2.8kN to 1.4kN (fig. 11). Moreover, it decreases the maximum value of the loading from 40kN to 30,7kN (fig. 11). After optimisation, the maximum value of the loading is lower than the critical value

of 31 kN. It is very important because a load higher than the critical one causes plastic deformation in the rail bed. This result was achieved by adjusting the  $Q$  value in the expression (6).

## 7. Wheel-rail contact forces and derailment

Safety was the third factor discussed in the introduction. Fig. 12 shows the result of the simulation of the Siemens train passing at the speed of 400 km/h before optimisation. The diagram shows the force in "wheel – rail" contact of four wheels of the second car. In the diagram and later, the time value refers to the first wheel of the car.

Diagrams of other wheels were shifted to mark the ends of the bridge. The second car should be considered because the vibration of this bridge superstructure stabilises after the first car passing and the superstructure vibration amplitude does not grow while the train passes the bridge (fig. 2). We can see the dangerous decrease of the forces downstream of the bridge when the force drops below the dangerous level of 23.8 kN [2] or even equals 0. It does not mean imminent derailment because it will occur in case of the

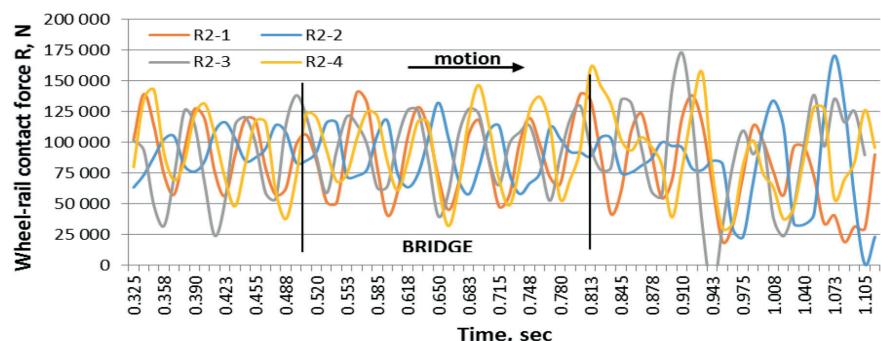


Fig. 12 - Forze di contatto ruota-rotaia verticali di quattro ruote di un veicolo durante il transito sul ponte prima dell'ottimizzazione.  
Fig. 12 - Vertical forces of four wheels of a train car during motion through the bridge before optimisation.

ma vale  $R_{min} = 39,3\text{kN}$ . Uno degli obiettivi dell'ottimizzazione è stato raggiunto mediante la determinazione della funzione  $\gamma(x)$  in base al criterio (6) senza modificare il passo di posa delle traverse nella zona di transizione ( $\delta(x)$ ). I problemi correlati alla modifica del passo di posa delle traverse sono descritti in [8].

## 8. Il ruolo di una sovrastruttura nell'ottimizzazione dell'interazione dinamica

In alcuni casi, i risultati dell'ottimizzazione descritti nei §6 e §7 non possono essere raggiunti a causa delle proprietà dinamiche della sovrastruttura del ponte. La fig. 14 dimostra questa tesi alla velocità di 350 km/h. L'aumento del modulo di rigidezza  $EJ$  della sovrastruttura di 2,5 volte non modifica il numero delle condizioni di pericolosità - ci sono tre intervalli di tempo in cui il limite (2) è violato in entrambi i casi. Questo esempio mostra l'importanza dell'ottimizzazione dell'intero sistema BTCS.

Se l'ottimizzazione del binario non porta alcun risultato positivo, è possibile lavorare in due direzioni: cambiare l'inefficiente sovrastruttura del ponte (per ottimizzarla) o diminuire la velocità del convoglio. La fig. 15 mostra le forze di contatto ruota-rotaia per il quinto veicolo del convoglio durante il transito su una sovrastruttura di lunghezza 50m con vibrazione illustrata nella fig. 3.

È possibile analizzare le forze di contatto ruota-rotaia per il quinto veicolo perché l'ampiezza della vibrazione della sovrastruttura aumenta fino al transito di questo veicolo (cfr. fig. 3).

La fig. 15 dimostra la violazione del limite (2) e l'inadeguatezza della forza di contatto ruota-rotaia causata dalla vibrazione in condizioni prossime alla risonanza della sovrastruttura del ponte. A causa di questa vibrazione e di uno spostamento eccessivo, la velocità e l'accelerazione dell'interazione dell'armamento ferroviario

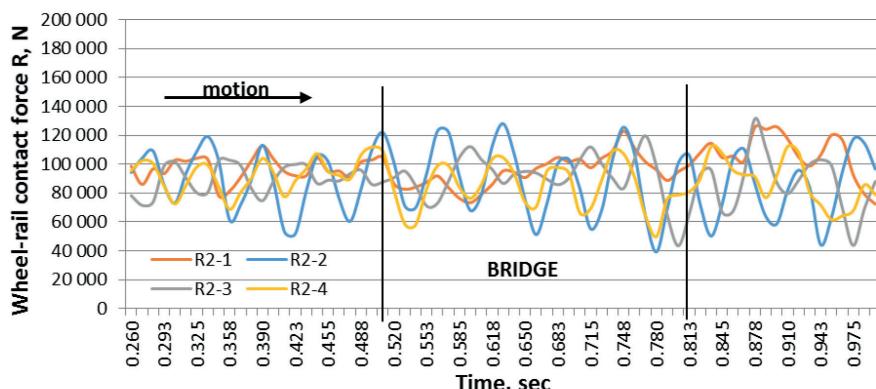


Fig. 13 - Forze verticali di contatto ruota-rotaia per quattro ruote del secondo veicolo durante transito sul ponte dopo l'ottimizzazione.

Fig. 13 - Vertical forces of four wheels of the train car during motion through the bridge after optimisation.

maximum lateral force (that does not depend on the discussed parameters) at the same moment. But it is a dangerous moment and it is important to avoid such a situation. The probability of wheel uplift exists and it was discussed in detail in [9].

Fig. 13 shows the result of optimisation according to criterion (6) and limitation (2) – the wheel-rail vertical contact forces remain greater than  $R_{lim} = 23.8 \text{ kN}$  while the train is passing the bridge and the minimal force value is  $R_{min} = 39.3 \text{ kN}$ . One of the targets of optimisation has been achieved by determining the  $\gamma(x)$  function according to the criterion (6) without changing the sleeper spacing in the transition zone ( $\delta(x)$ ). Issues related with changing the sleeper spacing are discussed in [8].

## 8. The role of a superstructure in the optimisation of the dynamic interaction

In some cases, the results of the optimisation described in sections 6 and 7 cannot be achieved because of the dynamic properties of the bridge superstructure. Fig. 14 demonstrates this thesis at the speed of 350 km/h. The increase of the rigidity index  $EJ$  of the superstructure by 2.5 does not change the number of dangerous moments – there are three intervals where the limitation (2) is violated in both cases. This example shows the importance of optimisation of the whole BTCS system.

If optimisation of the track does not lead to any positive result, it is possible to work in two directions: either change the ineffectual bridge superstructure (to optimize it) or decrease the train speed. Fig. 15 shows the wheel-rail contact force of the fifth car while it passes a 50m long superstructure with vibration shown in fig. 3.

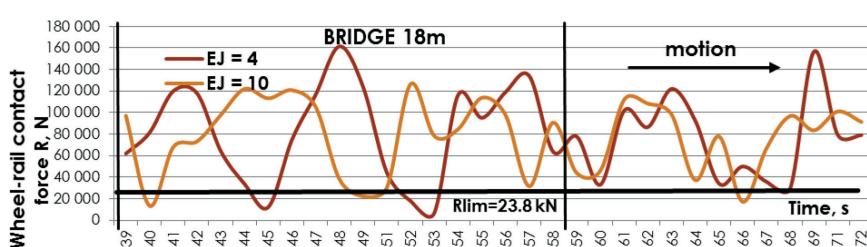


Fig. 14 - Forze verticali di contatto ruota-rotaia per diverso modulo di rigidezza  $EJ$  della sovrastruttura ponte.

Fig. 14 - Vertical forces in a wheel-rail contact for different rigidity index  $EJ$  of the bridge superstructure.

nel BTCS, diventano insoddisfacenti. In questo caso, l'ottimizzazione del binario non porta risultati positivi al contrario della vibrazione in assenza risonanza della sovrastruttura del ponte (fig. 13). Naturalmente è possibile ottenere resistenza della sovrastruttura del ponte, ma non la sicurezza di marcia. Le forze di contatto ruota-rotaia sono troppo piccole, producendo sollevamenti, ecc. Cosa pongono in atto gli operatori ferroviari in questi casi? Si riduce la velocità. La diminuzione di velocità non è una buona idea, perché si tratta di una errata correlazione delle proprietà dinamiche del ponte. Alla velocità di 300 km/h la situazione diviene ancora peggiore perché la velocità critica provoca una risonanza a circa 300 km/h. La fig. 16 mostra le forze verticali di quattro ruote del quinto veicolo durante il transito sulla sovrastruttura inefficiente alla velocità 300 km/h. I risultati insoddisfacenti si sono manifestati anche alla velocità di 350 km/h. È necessario rilevare che la velocità critica del convoglio per questa sovrastruttura è tra i 250 km/h ed i 300 km/h e la fig. 16 dimostra il risultato peggiore. In questi casi è necessario modificare le proprietà dinamiche della sovrastruttura del ponte. Questo esempio dimostra l'importanza dell'analisi dell'intero BTCS, ma non dei suoi componenti. In questi periodi, i legami interdisciplinari non sono molto forti, soprattutto nella progettazione di ponti ed è opportuna la ricerca scientifica in questo campo.

### 9. Il controllo del comfort durante l'ottimizzazione

L'ultimo fattore, non meno importante dei precedenti, è il comfort. In questo caso l'accelerazione degli estremi del veicolo mostra (fig. 17) valori inaccettabili. La tabella nella fig. 17, espone la stima dell'accelerazione in caso di transito sulla sovrastruttura inappropriata del ponte [7]. Il valore massimo di  $2 \text{ m/sec}^2$  può essere accettabile per una singola irregolarità di un binario ma non per un impalcato a campate multiple. È necessario controllare l'accelerazione del veicolo durante l'ottimizzazione, perché il limite sul comfort (3) e il criterio di massa (5) risultano in conflitto. La fig. 18 evidenzia che il comfort può avere un grande margine in caso di una sovrastruttura appropriata del ponte, tal che è possibile ridurre la massa della campata che è stata realizzata sulla base della fig. 4 e della fig. 5. Pertan-

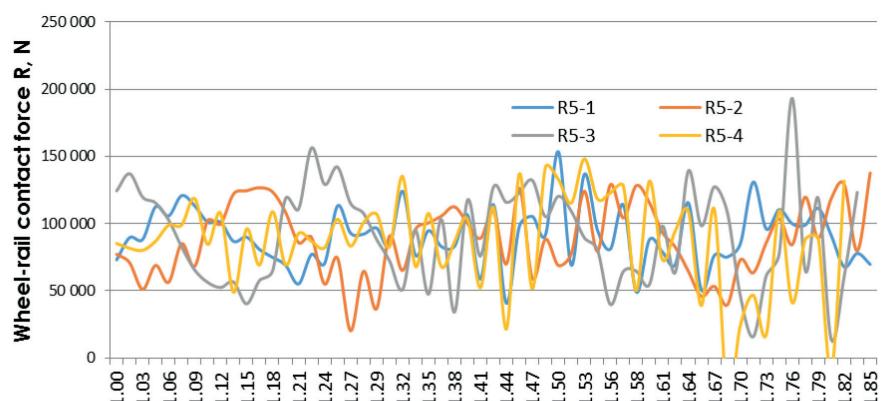


Fig. 15 - Le forze di contatto ruota-rotaia su una sovrastruttura di 50 m ( $v = 400 \text{ km/h}$ ).

Fig. 15 - Forces in the "wheel - rail" contact on a 50m long superstructure ( $v=400 \text{ km/h}$ ).

The wheel-rail contact forces can be analysed for the fifth car because the amplitude of the superstructure vibration is increasing up to this car (see fig. 3).

Fig. 15 demonstrates the violation of the limit (2) and the unsatisfactory wheel-rail contact force caused by near-resonance vibration of the bridge superstructure. As a result of this vibration and excessive displacement, velocity and acceleration of the rail bed interaction in the BTCS become unsatisfactory. In this case, the optimisation of the track does achieve positive results as opposed to non-resonance vibration of the bridge superstructure (fig. 13). Of course, the strength of the bridge superstructure can be obtained, but not the safety of motion. The "wheel-rail" contact forces are too small, uplifts occur, etc. What will railroad men do in such cases? They will decrease the speed. Speed decreasing is not a good idea because this is a mismatch of the bridge's dynamic properties. At the speed of 300 km/h the situation becomes even worse because the critical speed causes a resonance of about 300 km/h. Fig. 16 shows the vertical forces of four wheels of the fifth car during motion through the ineffectual superstructure at the speed 300 km/h. The unsatisfactory results appeared at the

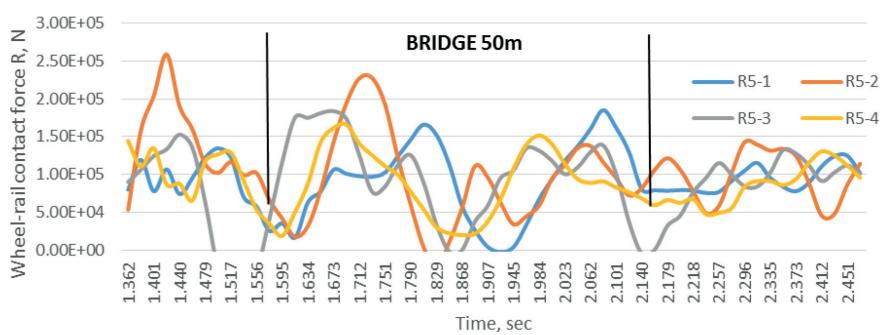


Fig. 16 - Forze verticali di contatto ruota-rotaia nel caso di vibrazioni della sovrastruttura prossima alla risonanza a 300 km/h.

Fig. 16 - Vertical wheel-rail contact forces in case of near-resonance vibration of the superstructure at 300 km/h.

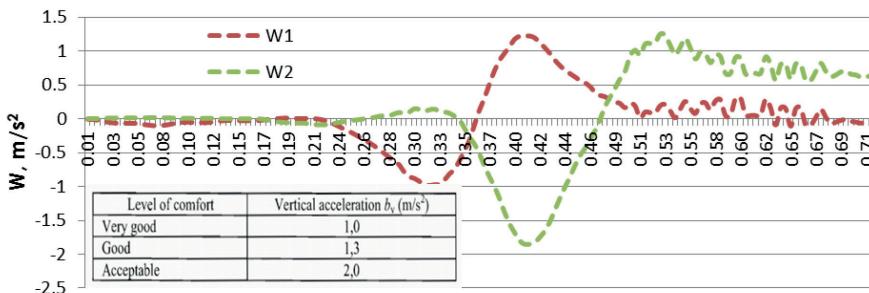


Fig. 17 - Acceleration of the car body ends.

Fig. 17 - Acceleration of the car body ends.

to, la riduzione della massa porta a un aumento dell'accelerazione proprio a causa del suo conflitto.

speed of 350 km/h as well. It is necessary to point out that the critical speed of the train for this superstructure is between 250-300 km/h and fig. 16 shows the worst result. In such cases, it is necessary to change the bridge superstructure's dynamic properties. This example shows the importance of the whole BTCS analysis, but not that of its components. Now, interdisciplinary links especially in bridge design are not too strong especially in the design of bridges and scientific research in this field is timely.

## 10. Conclusioni

La garanzia di sicurezza, durata, efficienza costruttiva e comfort sulla ferrovia ad alta velocità richiede la ricerca sul sistema di trasporto completo e congiunto che include veicoli, binario e sovrastruttura dell'impalcato. L'appoggio sviluppato sulla base del sistema di trasporto congiunto consente di creare il sistema multi-corpo con comportamento dinamico previsto e crea le basi all'uso dell'intelligenza artificiale nello sviluppo della progettazione ferroviaria.

Il comportamento previsto del sistema multi-corpo BTCS è ottenuto con:

- la descrizione precisa della vibrazione mediante un sistema equalitario;
- l'inclusione di funzioni di controllo nelle equazioni di vibrazione e nei criteri;
- la ricerca delle funzioni di controllo, che rendono estremanti i diversi criteri;
- il raggiungimento della predetta entità estremante dei parametri di vibrazione (il massimo spostamento, momento flettente, ecc.);
- determinati parametri che non sono superiori all'entità prevista (forza di contatto ruota-rotaia minima, accelerazione della cassa del veicolo).

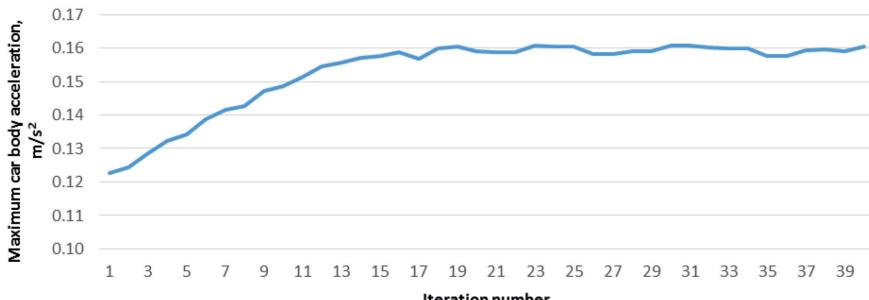


Fig. 18 - Possibilità di controllo del comfort durante l'ottimizzazione.

Fig. 18 - Possibility of comfort control during optimisation.

## 9. Comfort control during optimisation

The last factor but not the least is comfort. The acceleration of the car body ends shows (fig. 17) unacceptable acceleration values in this case. The table in fig. 17, shows the acceleration estimate in case of motion through an untoward bridge superstructure [7]. The maximum value of 2 m/sec<sup>2</sup> may be acceptable for a single irregularity of a track but not for a multiple-span flyover. The acceleration of the car body must be controlled during optimisation, because the comfort limit (3) and mass criterion (5) are in conflict. Fig. 18 highlights that comfort may have a great margin in case of an appropriate bridge superstructure, so the mass of the beam that was made according to figg. 4 and 5 can be reduced. Thus, mass reduction leads to acceleration increase because of its conflict.

## 10. Conclusions

The guarantee of safety, durability, material efficiency and comfort on the high-speed railroad requires research of the united carrier system that includes cars, track and fly-over superstructure. The approach developed on the basis of the united carrier system allows creating the multibody system with predicted dynamic behaviour and sets the foundations for the use of artificial intelligence in railroad design development.

Predicted behaviour of the multibody system BTCS is achieved by:

- precise description of vibration by means of equality system;
- including controlling functions both in the vibration equations and in criteria;
- searching the controlling functions, that make different criteria extreme;
- achievement of the predicted extreme volume of vibration parameters (maximum displacement, bending moment, etc.);

L'ottimizzazione del sistema consente:

- di ridurre la massa della sovrastruttura fino al 15%. La rigidezza della campata diminuisce di conseguenza, ma entrambi i parametri non mutano in maniera identica lungo la sovrastruttura. I cambiamenti sono più significativi in particolari luoghi, tali da influenzare leggermente il comportamento della campata e da conservare il momento flettente massimo;
- di ridurre la sovrasollecitazione locale sulla massicciata al valore che impedisce la rarefazione della massicciata e l'irregolarità del profilo;
- di diminuire di due volte il valore della deviazione standard della sollecitazione sull'armamento ferroviario che consente di ridurre l'irregolarità del profilo della linea;
- di garantire la marcia della ruota sull'impalcato senza sollevamento e di diminuire la probabilità di deraglimento;
- di fornire un buon comfort di marcia al veicolo sull'impalcato a campate multiple.

- certain parameters that are not in excess of the predicted volume (minimal wheel-rail rolling contact force, acceleration of a car body).

*Optimisation of the system allows:*

- to decrease the mass of the superstructure up to 15%. The beam rigidity decreases accordingly, but both parameters do not change identically along the superstructure. Changes are more significant in particular places, so they slightly influence the beam behaviour, and the maximum bending moment remains the same;
- to decrease the ballast local overload to the value that prevents ballast draft and decrease the profile irregularity;
- to decrease the standard deviation of load on the rail bed twice that allows reducing the profile irregularity;
- to guarantee wheel motion across the flyover without uplift and decrease derailment probability;
- to provide good comfort while a train is moving on the multi-span flyover.

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] V.Y. POLIAKOV, "Dynamic Interaction within a 'Bridge-Track-Car' System on a High-Speed Railway", in J. Pombo, (Editor), "Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance", Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 136, 2016. doi:10.4203/ccp.110.136.
- [2] V.Y. POLIAKOV, "Interaction optimization in bridge-track-car system", Proceedings of the Euromech colloquium 578 Rolling Contact Mechanics for Multibody System Dynamics, Funchal, Madeira, Portugal, April 10 to 13, 2017 - University of Lisbon, Institute of Mechanical Engineering (IDMEC), Portugal, 2017 ISBN: 978-989-99424-3-1.
- [3] D.E. KIRK, "Optimal Control Theory", 1998, Dover Publications, Inc., New York, 479 p.
- [4] E.J. HAUG, J.S. ARORA, "Applied Optimal Design", 1979, John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 471.
- [5] V.Y. POLYAKOV, "The interaction of rolling stock with elements of a bridge at high speed motion", Doctor of Sciences (Tech.) thesis. Moscow, 1994, 395 p. (Поляков В. Ю. Взаимодействие подвижного состава с элементами мостового перехода при высокоскоростном движении/Дис... док. техн. наук. – М., 1994. – 395 с.).
- [6] M. VERIGO, A. KOGAN, "Track and Rolling Stock Interaction", 1986, Moscow, Transport publishing, 559 p. (Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. Москва: Транспорт, 1986. 559с.).
- [7] Basis of structural design. European standard EN 1990:2002+A1, Supersedes ENV 1991-1:1994, Incorporating corrigenda December 2008 and April 2010.
- [8] V.Y. POLIAKOV, "Interaction Optimization in Multibody Dynamic System", International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol.2, 2017, pp. 43-51. ISSN:2367-8992 <http://www.iaras.org/iaras/journals/ijtam>
- [9] n. MATSUMOTO & k. ASANUMA, "Some experiences on track-bridge interaction in Japan", Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways, 2009, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 80-97.
- [10] V.Y. POLIAKOV, "Pareto-optimal bridge superstructures on high-speed railways", Transport construction, 6, 2016, pp. 21-24. ISSN: 01 31-4300. (Поляков В.Ю. Парето-оптимальные пролетные строения для высокоскоростных магистралей // Транспортное строительство, №6, 2016, с.21-24).