

МЕХАНИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА МОСТОВИ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИЯ, СВЪРЗАНА С ПРОМЯНА НА СТАТИЧЕСКАТА СХЕМА

Доц. д-р Нели Димитрова Тризлова
Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – Варна

Абстракт: Реконструкцията на мостови конструкции представлява сложен инженерно-строителен процес, при който механичното поведение на конструкцията се изменя в зависимост от последователното изменение на статическата ѝ схема. В практиката конструктивната безопасност често се оценява основно за крайното експлоатационно състояние, докато временните етапи на реконструкцията остават недостатъчно анализирани, въпреки че именно тогава могат да възникнат най-неблагоприятните напрегнати състояния. В настоящата статия е предложен подход за оценка на механичното поведение на мостови конструкции през всички етапи на реконструкцията чрез последователно разглеждане на временните статически схеми. Проследени са измененията на огъващите моменти, срязващите сили, опорните реакции, вертикалните премествания и миграцията на критичните сечения. Като практически пример е разгледана реконструкцията на моста Shili (Китай). Получените резултати показват, че максималните вътрешни усилия и премествания не винаги възникват в окончателното конструктивно състояние, а могат да се проявят в междинните етапи на реконструкцията. Това потвърждава необходимостта временните статически схеми да бъдат разглеждани като самостоятелни обекти на конструктивен анализ при оценката на безопасността на мостови конструкции.

Ключови думи: мостови конструкции; реконструкция; механично поведение; временни статически схеми; вътрешни усилия; критични сечения; конструктивна безопасност.

MECHANICAL BEHAVIOR OF BRIDGE STRUCTURES DURING RECONSTRUCTION

Assoc. Prof. Dr. Neli Dimitrova Trizlova
Varna Free University “Chernorizets Hrabar” – Varna

Abstract: Bridge reconstruction is a complex engineering process in which the mechanical behavior of the structure changes continuously due to successive modifications of

its structural system. In engineering practice, structural safety is commonly assessed for the final service condition, whereas the temporary stages of reconstruction are often insufficiently considered, although they may govern the most unfavorable stress and deformation states. This paper proposes an approach for evaluating the mechanical behavior of bridge structures throughout the entire reconstruction process by sequentially analyzing the temporary structural systems. Variations in bending moments, shear forces, support reactions, vertical displacements, and the migration of critical sections are investigated. The reconstruction of the Shili Bridge (China) is presented as a case study. The results demonstrate that the maximum internal forces and displacements do not necessarily occur in the final structural configuration but may develop during intermediate reconstruction stages. The study confirms the necessity of treating temporary structural systems as independent objects of structural analysis when assessing the safety of bridge reconstruction projects.

Keywords: *bridge structures; reconstruction; mechanical behavior; temporary structural systems; internal forces; critical sections; structural safety.*

1. Въведение

Промяната на статическата схема е една от най-съществените конструктивни интервенции при реконструкцията на мостови съоръжения, тъй като определя механичното поведение на конструкцията след завършване на строителните работи [1]. Оценката на последствията от тази промяна върху вътрешните усилия, опорните реакции и деформациите е разгледана в редица инженерни изследвания и представлява основен етап при проектирането на реконструкцията.

В инженерната практика обаче реконструкцията не представлява моментна промяна от една статическа схема към друга [3]. По време на строително-монтажните работи конструкцията последователно преминава през временни конструктивни състояния, породени от демонтаж на съществуващи елементи, изпълнение на временни подпори, изграждане на нови конструктивни части и поетапно възстановяване на носещата система. Всяко от тези състояния се характеризира със собствена временна статическа схема и съответно със специфично механично поведение.

Именно през тези временни етапи могат да възникнат най-неблагоприятните вътрешни усилия, премествания и критични сечения, които не винаги съвпадат с тези в окончателното експлоатационно състояние. Поради това анализът на механичното

поведение по време на реконструкцията следва да се разглежда като самостоятелна инженерна задача, допълваща оценката на окончателната статическа схема.

Целта на настоящото изследване е да се анализира механичното поведение на мостови конструкции **през отделните етапи на реконструкция, свързана с промяна на статическата схема**, чрез проследяване на временните статически схеми и съответните изменения на вътрешните усилия, опорните реакции, преместванията и критичните сечения. Проследени са измененията на огъващите моменти, срязващите сили, опорните реакции, вертикалните премествания и миграцията на критичните сечения. Предложеният подход е илюстриран чрез реален пример за реконструкция на мост и може да подпомогне инженерната оценка на конструктивната безопасност през всички етапи на строителния процес [4].

2. Теоретични основи

2.1. Строителната последователност като конструктивен фактор

При реконструкцията на мостови конструкции строителната последователност определя реда, по който се изпълняват отделните конструктивни интервенции. От инженерна гледна точка този ред не представлява единствено технологична организация на строителния процес, а фактор, който пряко влияе върху механичното поведение на конструкцията. Във всеки етап от реконструкцията се изменят геометрията на носещата система, условията на опиране, конструктивните връзки или коравината на отделните елементи, което води до промяна на начина на предаване на външните натоварвания [5].

Поради тази причина една и съща реконструкция може да доведе до различни вътрешни усилия в зависимост от избраната последователност на изпълнение. Дори когато окончателното конструктивно решение е еднакво, различният ред на демонтаж, временно подпиране, усиляване и възстановяване на носещите елементи може да предизвика съществени различия в напрегнатото и деформираното състояние по време на строителството.

Следователно строителната последователност следва да се разглежда като самостоятелен конструктивен фактор, който определя не само безопасността на изпълнението, но и механичното поведение на мостовата конструкция през целия процес на реконструкция.

2.2. Временни статически схеми

Всеки съществен етап от реконструкцията формира временно конструктивно състояние, което се характеризира със собствена статическа схема. Тези временни схеми могат да се различават както от първоначалната, така и от окончателната схема на мостовата конструкция. Причината е, че по време на строителните работи отделни носещи елементи могат временно да бъдат демонтирани, заменени, усилены или подпирани, а конструктивните връзки и лагерните устройства често преминават през междинни състояния.

Временната статическа схема описва действителния начин, по който конструкцията поема и предава натоварванията в конкретния момент от реконструкцията [2]. Следователно за всеки етап трябва да бъде изграден отделен изчислителен модел, който да отчита реалното конструктивно състояние, а не проектната схема преди или след реконструкцията.

Пренебрегването на временните статически схеми може да доведе до неправилна оценка на вътрешните усилия и до подценяване на критичните състояния, възникващи по време на изпълнението.

2.3. Временно механично поведение

Промяната на статическата схема във всеки етап от реконструкцията води до изменение на механичното поведение на конструкцията. Променят се пътищата на предаване на усилията, разпределението на огъващите моменти, срязващите сили, нормалните усилия, опорните реакции и деформациите. В резултат могат да възникнат временни критични сечения, които отсъстват както в първоначалното, така и в окончателното конструктивно състояние.

Особено чувствителни са етапите, при които носещата система е частично демонтирана, конструктивните връзки все още не са възстановени или временните подпори поемат основната част от натоварването. В тези случаи конструкцията работи при условия, различни от проектните, което може да доведе до локални концентрации на напрежения, увеличени деформации и неблагоприятно преразпределение на вътрешните усилия.

Следователно безопасността на реконструкцията не може да бъде оценявана единствено въз основа на първоначалната и окончателната статическа схема.

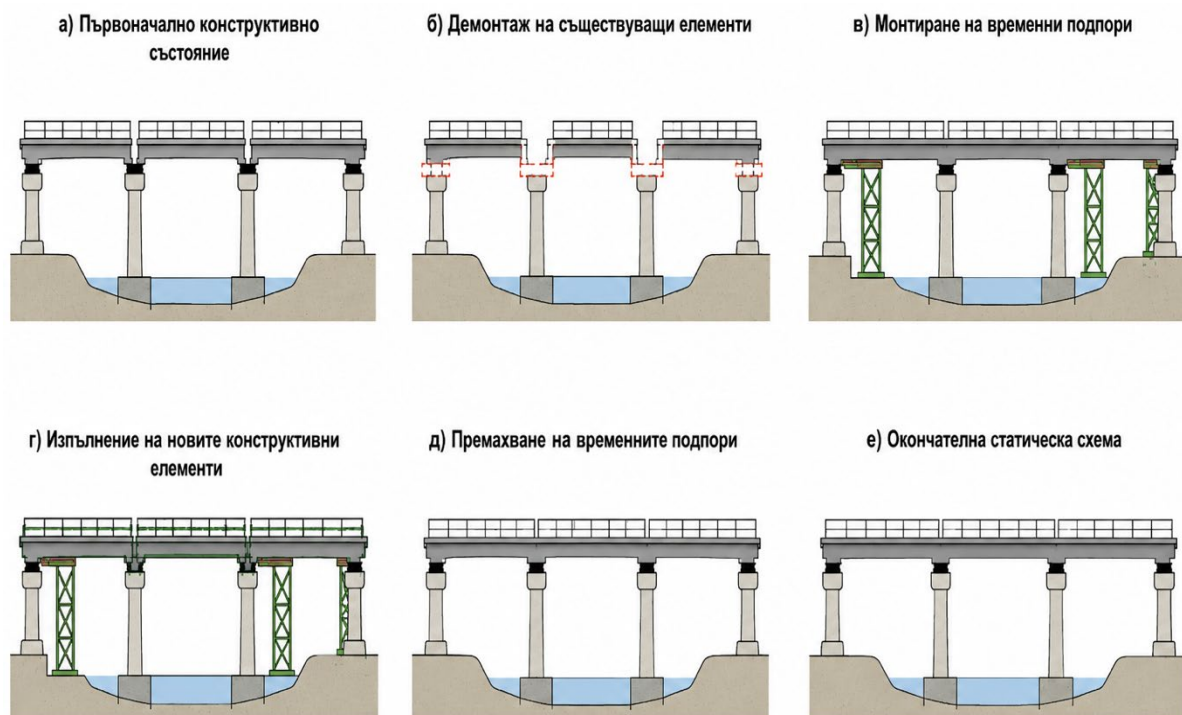
Необходимо е да бъде анализирано механичното поведение на конструкцията във всеки съществен етап от строителната последователност, тъй като именно временните конструктивни състояния често определят критичните условия за безопасна експлоатация по време на реконструкцията.

3. Основни етапи на реконструкцията

Реконструкцията на мостови конструкции представлява последователност от конструктивни интервенции, при които носещата система преминава през поредица от временни състояния до достигане на окончателната проектна схема. Всеки етап се характеризира със собствена статическа схема и съответно със специфично механично поведение. Поради това безопасността на реконструкцията трябва да се оценява не само за крайното състояние, но и за всички съществени междинни етапи.

3.1. Демонтаж на съществуващи конструктивни елементи

Първият етап обикновено включва демонтаж на дилатационни фуги, лагерни устройства, части от пътната плоча или отделни носещи елементи (фиг.1). В резултат конструкцията временно губи част от първоначалната си коравина и се променя начинът на предаване на усилията. Именно през този етап често възникват първите временни изменения на статическата схема.



Фиг. 1. Последователност на основните етапи при реконструкция на мостова конструкция

3.2. Монтиране на временни подпори

За осигуряване на необходимата конструктивна безопасност по време на реконструкцията се изграждат временни подпори или помощни носещи конструкции. Те поемат част от постоянните и временните натоварвания, изменят опорните условия и формират нова временна статическа схема. Разпределението на вътрешните усилия вече се определя както от съществуващата конструкция, така и от взаимодействието ѝ с временната подпорна система.

3.3. Изпълнение на новите конструктивни елементи

След стабилизиране на конструкцията се изпълняват новите носещи елементи, конструктивни връзки или усилвания. В този етап постепенно се възстановява непрекъснатостта на конструкцията и започва преразпределение на вътрешните усилия към новообразуваната носеща система. Механичното поведение вече се различава както от първоначалното, така и от предходното временно състояние [6].

3.4. Премахване на временните подпори

След достигане на необходимата якост и коравина временните подпори се демонтират. Натоварването постепенно се прехвърля към новата конструктивна схема, което води до окончателно преразпределение на вътрешните усилия, деформациите и опорните реакции. Именно през този преходен процес могат да възникнат максимални временни усилия в отделни конструктивни елементи.

3.5. Формиране на окончателната статическа схема

След приключване на всички строително-монтажни работи мостовата конструкция достига проектното си конструктивно състояние. Едва тогава се установява окончателното разпределение на вътрешните усилия и деформациите, което се използва при експлоатационната оценка на съоръжението. Сравнението между временните и окончателната статическа схема позволява да се оцени влиянието на строителната последователност върху механичното поведение на реконструирувания мост.

4. Анализ на механичното поведение

Механичното поведение на мостовата конструкция се изменя във всеки етап от реконструкцията вследствие на промяната на статическата схема, конструктивните връзки и начина на предаване на натоварванията. В резултат на това вътрешните усилия, опорните реакции и деформациите не остават постоянни, а се преразпределят в зависимост от текущото конструктивно състояние.

За оценка на безопасността е необходимо всеки етап от строителната последователност да бъде разглеждан като самостоятелно изчислително състояние, за което се определят характерните механични параметри. Анализът обхваща измененията на огъващите моменти, срязващите сили, опорните реакции, прогибите и положението на критичните сечения.

4.1. Изменение на огъващите моменти

Огъващите моменти са сред най-чувствителните параметри към промяната на статическата схема. При демонтаж на конструктивни елементи или временно подпиране част от моментите намаляват, докато в други сечения възникват нови максимуми. След изпълнение на новите конструктивни връзки и премахване на временните подпори се извършва окончателно преразпределение на моментите съобразно новата статическа схема.

Следователно максималният огъващ момент не винаги възниква в окончателното конструктивно състояние. В редица случаи най-неблагоприятното напрегнато състояние се достига именно по време на реконструкцията.

4.2. Изменение на срязващите сили

Промяната на опорните условия и преразпределението на вертикалните натоварвания водят до изменение на срязващите сили в носещите елементи. Особено чувствителни са зоните в близост до временните подпори и участъците, в които се променя начинът на предаване на натоварването.

След премахването на временните конструкции срязващите сили постепенно достигат стойностите, характерни за окончателната схема.

4.3. Изменение на опорните реакции

Опорните реакции зависят непосредствено от статическата схема на конструкцията. Въвеждането на временни подпори създава нови опорни точки, които променят разпределението на вертикалните реакции между съществуващите и временните опори.

При демонтиране на подпорите натоварването постепенно се прехвърля обратно към окончателната носеща система, като реакциите достигат експлоатационните си стойности.

4.4. Изменение на вертикалните премествания

Промените в коравината на конструкцията и в опорните условия оказват непосредствено влияние върху вертикалните премествания на носещата система. Монтирането на временни подпори обикновено води до ограничаване на преместванията, докато демонтажът на отделни конструктивни елементи или временното намаляване на коравината може да предизвика увеличаването им.

Вертикалните премествания представляват важен показател за механичното поведение на конструкцията по време на реконструкцията, тъй като отразяват съвместното влияние на изменената статическа схема, коравината на носещата система и начина на предаване на натоварванията. Проследяването им във всеки етап позволява своевременно откриване на неблагоприятни деформации и оценка на безопасността на строителния процес.

За по-ясно представяне на резултатите в табл. 1 е направено обобщение на характерните изменения в механичното поведение на мостовата конструкция през основните етапи на реконструкцията. Проследени са измененията на огъващите моменти, срязващите сили, опорните реакции, вертикалните премествания и положението на критичните сечения при преминаването между отделните временни статически схеми. Таблицата показва, че всяка промяна в строителната последователност води до ново преразпределение на усилията и деформациите, поради което временните конструктивни състояния следва да бъдат анализирани като самостоятелни етапи при оценката на конструктивната безопасност.

Особено внимание заслужава проследяването на миграцията на критичните сечения, тъй като тя показва как зоните с максимално напрегнато състояние се преместват в зависимост от промените в статическата схема. По този начин таблицата не само обобщава механичното поведение на конструкцията, но и позволява да бъдат идентифицирани етапите, при които рискът от достигане на гранични състояния е най-голям. Полученото обобщение потвърждава необходимостта оценката на конструктивната безопасност да обхваща всички временни етапи на реконструкцията, а не само окончателното експлоатационно състояние.

Таблица 1. Изменение на основните механични характеристики на мостовата конструкция през отделните етапи на реконструкцията

Етап	Огъващи моменти	Срязващи сили	Опорни реакции	Вертикални премествания	Критични сечения
Демонтаж	Преразпределение	Локално изменение	Изменение	Увеличаване	Промяна на положението
Временни подпори	Намаляване в част от отворите	Преразпределение	Преразпределение	Намаляване	Нови критични сечения
Нови елементи	Постепенно стабилизиране	Стабилизиране	Изменение	Намаляване	Изместване към окончателното положение
Премахване на подпорите	Окончателно преразпределение	Окончателно преразпределение	Окончателно преразпределение	Достигане на експлоатационните стойности	Окончателно положение
Експлоатация	Стабилизирано разпределение	Стабилизирано разпределение	Постоянни	Стабилизиране	Проектни критични сечения

4.5. Изменение (миграция) на критичните сечения

Една от характерните особености на механичното поведение на мостовите конструкции по време на реконструкцията е **миграцията на критичните сечения**. Под миграция на критичното сечение се разбира промяната на местоположението на сечението, в което възниква най-неблагоприятното напрегнато състояние, вследствие на изменението на статическата схема през отделните етапи на строителната последователност.

При първоначалното конструктивно състояние критичното сечение обикновено се определя от проектната статическа схема и съответства на зоните с максимални огъващи моменти, срязващи сили или техните неблагоприятни комбинации. По време на реконструкцията обаче всяка промяна в носещата система – демонтаж на конструктивни елементи, изпълнение на временни подпори, изграждане на нови елементи или премахване на временните конструкции – води до изменение на пътищата на предаване на натоварванията и до преразпределение на вътрешните усилия.

В резултат на тези процеси критичното сечение не остава постоянно, а **последователно променя своето положение**. То може да се премести от средата на отвора към опорна зона, да възникне в близост до временна подпора, в зоната на връзката между съществуващ и нов конструктивен елемент или в друг участък, който при окончателното експлоатационно състояние не представлява конструктивно определящо място.

Миграцията на критичното сечение представлява закономерна последица от изменението на статическата схема и следва да бъде разглеждана като естествен етап от механичното поведение на реконструираната конструкция, а не като случайно явление. Положението на критичното сечение във всеки момент се определя от текущото разпределение на усилията, което е пряко обусловено от конкретния етап на строителната последователност.

Практическото значение на това явление е свързано с необходимостта проверките за носимоспособност и експлоатационна пригодност да се извършват за всяко временно конструктивно състояние. Ограничаването на анализа единствено до първоначалната и окончателната статическа схема създава предпоставки за пропускане на временни критични състояния, които в определени етапи на реконструкцията могат да бъдат по-неблагоприятни от експлоатационното състояние.

Следователно миграцията на критичното сечение може да бъде разглеждана като един от основните показатели за изменението на механичното поведение на мостовата конструкция по време на реконструкцията. Проследяването на тази миграция позволява своевременно идентифициране на потенциално опасните участъци и повишава надеждността на конструктивната оценка през целия строителен процес.

5. Методика за оценка на механичното поведение при реконструкция на мостови конструкции

Предлаганата методика се основава на разглеждането на реконструкцията като последователност от временни конструктивни състояния, всяко от които се характеризира със собствена статическа схема и съответно със специфично механично поведение [7]. За разлика от традиционния подход, при който се сравняват единствено първоначалното и окончателното конструктивно състояние, настоящата методика включва анализ на всички съществени етапи от строителната последователност.

Методиката се състои от следните последователни стъпки:

Етап 1. Определяне на първоначалната статическа схема

Определя се конструктивното състояние преди започване на реконструкцията. Изчисляват се вътрешните усилия, опорните реакции, вертикалните премествания и критичните сечения.

Етап 2. Моделиране на временните конструктивни състояния

За всеки основен етап от реконструкцията се създава самостоятелен изчислителен модел, който отчита:

- демонтажа на конструктивни елементи;
- изпълнението на временни подпори;
- изграждането на новите конструктивни елементи;
- премахването на временните подпори.

Етап 3. Анализ на механичното поведение

За всяко временно конструктивно състояние се определят:

- огъващите моменти;
- срязващите сили;
- опорните реакции;
- вертикалните премествания;
- критичните сечения.

Получените резултати се сравняват между отделните етапи, като се проследява изменението на механичното поведение през целия процес на реконструкцията.

Етап 4. Определяне на най-неблагоприятното конструктивно състояние

Чрез сравнение на резултатите се определя етапът, при който възникват най-неблагоприятните вътрешни усилия, максималните премествания или критичните сечения. Това състояние се приема за определящо при оценката на безопасността по време на строителството.

Етап 5. Анализ на окончателната статическа схема

След приключване на реконструкцията се анализира окончателното конструктивно състояние и резултатите се сравняват с тези от всички предходни етапи [9].

Научната идея на методиката

Предложеният подход не разглежда реконструкцията като преход между две крайни състояния, а като **непрекъсната последователност от временни конструктивни състояния**, всяко от които може да бъде определящо за безопасността на конструкцията. По този начин се осигурява възможност за идентифициране на временни критични състояния, които не могат да бъдат установени при анализ единствено на първоначалната и окончателната статическа схема.

Предложената методика въвежда реконструкцията като последователност от временни статически схеми, при които механичното поведение се проследява на всеки етап, а не само преди и след реконструкцията.

6. Практически пример

6.1. Обект на изследване

За демонстриране на предложената методика е избран **Shili Bridge**, тъй като процесът на реконструкция е добре документиран чрез последователни фотографии, отразяващи основните строителни етапи [8]. Това позволява реконструкцията да бъде разгледана като последователност от временни конструктивни състояния, всяко със собствена статическа схема и механично поведение.

За разлика от традиционния анализ, при който се сравняват само първоначалното и окончателното състояние на конструкцията, настоящото изследване проследява изменението на механичното поведение във всеки основен етап от реконструкцията.

6.2. Основни етапи на реконструкцията

Реконструкцията на **Shili Bridge** е осъществена чрез последователно изпълнение на няколко основни строителни етапа, при които конструкцията преминава през редица временни конструктивни състояния (фиг.2). Всеки етап се характеризира със специфична статическа схема, различни условия на опирание и различно разпределение на вътрешните усилия. Следователно механичното поведение на моста не може да бъде оценено единствено чрез сравнение на първоначалното и окончателното състояние, а трябва да бъде проследено през цялата строителна последователност.



Фиг. 2. Основни етапи от реконструкцията на моста Shili, Китай (съставено от автора по материали от проекта).

Етап 1 – Първоначално конструктивно състояние

Преди започване на реконструкцията мостът функционира съгласно първоначалната си проектна статическа схема. Натоварванията се предават по установените пътища към устоите и междинните опори, а вътрешните усилия, опорните реакции и вертикалните премествания съответстват на експлоатационното състояние на конструкцията. Това състояние служи като отправна база за сравнение на всички последващи етапи.

Етап 2 – Демонтаж на съществуващата конструкция

В процеса на реконструкцията се извършва частичен демонтаж на конструктивни елементи. Отстраняването им изменя непрекъснатостта на носещата система, което води до промяна на статическата схема и до преразпределение на вътрешните усилия. В този етап могат да възникнат временни конзолни участъци, локално намалена коравина и нови критични сечения, които не съществуват при нормална експлоатация.

Етап 3 – Изпълнение на временни подпори

За осигуряване на носимоспособността по време на строителните работи се изграждат временни подпори, които временно изменят схемата на опирание. Част от

вертикалните товари се прехвърлят към временната конструкция, вследствие на което настъпва ново преразпределение на огъващите моменти, срязващите сили и опорните реакции. Това е един от най-характерните етапи, при който механичното поведение на конструкцията се различава съществено както от първоначалното, така и от окончателното състояние.

Етап 4 – Изграждане на новите конструктивни елементи

След стабилизиране на конструкцията започва изпълнението на новите носещи елементи. С постепенното възстановяване на носещата система част от усилията започват да се прехвърлят към новоизградените конструктивни части. В този период едновременно работят съществуващи, новоизпълнени и временни елементи, което води до сложна пространствена работа на конструкцията и до непрекъснато изменение на механичното ѝ поведение.

Етап 5 – Премахване на временните подпори и формиране на окончателната статическа схема

След завършване на строителните работи временните подпори се премахват и натоварванията окончателно се прехвърлят към реконструираната мостова конструкция. Формира се окончателната статическа схема, съответстваща на проектното решение. Въпреки това механичното поведение през предходните временни етапи остава определящо за оценката на безопасността, тъй като именно тогава могат да възникнат най-неблагоприятните конструктивни състояния.

Въз основа на тази последователност реконструкцията може да бъде разглеждана като **непрекъсната промяна на статическата схема**, при която всеки строителен етап представлява самостоятелно конструктивно състояние със собствено механично поведение. Именно това разбиране е в основата на предложената в настоящото изследване методика за оценка на безопасността по време на реконструкцията.

6.3. Проследяване на механичното поведение

За всеки конструктивен етап от реконструкцията се извършва последователен анализ на механичното поведение на мостовата конструкция [10]. Оценката се основава на сравнението между отделните временни статически схеми, като се проследява изменението на основните механични характеристики, определящи носимоспособността и експлоатационната пригодност на конструкцията.

Анализът включва:

- **изменението на огъващите моменти**, характеризиращо преразпределението на огъването вследствие на промяната в статическата схема;
- **изменението на срязващите сили**, отразяващо промяната в пътищата на предаване на вертикалните натоварвания и локалното натоварване на отделните конструктивни елементи;
- **изменението на опорните реакции**, позволяващо да се оцени преразпределението на натоварванията между постоянните и временните опори през различните строителни етапи;
- **изменението на вертикалните премествания**, което служи като показател за промените в коравината на конструкцията и за деформационното ѝ поведение по време на реконструкцията;
- **миграцията на критичните сечения**, чрез която се определя преместването на зоните с най-неблагоприятно напрегнато състояние при изменението на статическата схема.

Проследяването на тези показатели за всяко временно конструктивно състояние позволява да се анализира развитието на механичното поведение през целия процес на реконструкцията. По този начин могат да бъдат идентифицирани етапите, при които възникват максимални вътрешни усилия, най-големи деформации или най-неблагоприятни комбинации от натоварвания, независимо че те могат да не съвпадат с окончателното експлоатационно състояние.

Предложеният подход позволява реконструкцията да бъде разглеждана като **последователност от временни механични състояния**, а не като преход единствено между две крайни статически схеми. Това осигурява по-пълна оценка на конструктивната безопасност и създава възможност за своевременно идентифициране на критичните етапи в строителната последователност.

6.4. Анализ на резултатите

Съпоставянето на механичното поведение на мостовата конструкция през отделните етапи на реконструкцията показва ясно изразено изменение на вътрешното силово състояние вследствие на променящата се статическа схема. Всеки конструктивен етап се характеризира със собствено разпределение на усилията, деформациите и опорните

реакции, което потвърждава, че временните конструктивни състояния представляват самостоятелни механични системи.

Получените резултати показват, че максималните огъващи моменти, срязващи сили, опорни реакции и вертикални премествания не възникват задължително в окончателната експлоатационна схема. В определени етапи на демонтажа, изпълнението на временните подпори или изграждането на новите конструктивни елементи се наблюдават по-неблагоприятни комбинации от вътрешни усилия, породени от временното изменение на условията на работа на конструкцията.

Анализът на миграцията на критичните сечения показва, че зоните с максимално напрегнато състояние се променят в зависимост от строителната последователност. Това означава, че критичните участъци не са постоянни, а се преместват при преминаването от една временна статическа схема към следващата. Следователно оценката на безопасността не може да бъде ограничена единствено до окончателното конструктивно състояние.

Получените резултати потвърждават издигнатата хипотеза, че **строителната последователност представлява самостоятелен фактор, определящ механичното поведение на мостовата конструкция по време на реконструкцията**. Разглеждането на реконструкцията като последователност от временни статически схеми позволява да бъдат идентифицирани критичните строителни етапи още във фазата на проектиране и да се планират подходящи временни укрепвания и организационни мерки за безопасност.

Предложеният подход създава възможност за по-надеждна оценка на конструктивната безопасност при реконструкция на мостове, тъй като отчита не само крайното експлоатационно състояние, но и всички междинни конструктивни състояния, през които конструкцията преминава по време на строителния процес.

7. Заключение

Изследването показва, че механичното поведение на мостовите конструкции при реконструкция не се определя единствено от първоначалната и окончателната статическа схема, а от цялата последователност на временните конструктивни състояния, възникващи по време на строителния процес. Всеки етап на реконструкцията

представлява самостоятелна временна статическа схема, характеризираща се със специфично разпределение на вътрешните усилия, опорните реакции, вертикалните премествания и положението на критичните сечения.

Извършеният анализ показва, че най-неблагоприятното механично състояние на конструкцията не винаги съвпада с окончателното експлоатационно състояние. В определени етапи от демонтажа, изпълнението на временните подпори или изграждането на новите конструктивни елементи могат да възникнат по-неблагоприятни комбинации от вътрешни усилия и деформации, които следва да бъдат отчетени още при проектирането на реконструкцията.

Основният научен принос на настоящото изследване се състои в разработването на методически подход, при който **строителната последователност се разглежда като самостоятелен фактор, определящ механичното поведение на мостовите конструкции при реконструкция**. За разлика от традиционния подход, основан на сравнение между началното и крайното състояние, предложеният метод разглежда реконструкцията като последователност от временни статически схеми, всяка от които има собствено механично поведение.

Получените резултати показват, че при реконструкции, свързани с промяна на статическата схема, най-неблагоприятното механично състояние не винаги съответства на окончателната експлоатационна схема, а често възниква през отделни временни етапи на строителния процес. Това потвърждава необходимостта временните статически схеми да бъдат самостоятелен обект на инженерна оценка.

Научни приноси

1. Предложен е нов методически подход за оценка на механичното поведение на мостови конструкции по време на реконструкция, основан на последователен анализ на временните статически схеми.
2. Установено е, че строителната последователност представлява самостоятелен конструктивен фактор, който оказва съществено влияние върху разпределението на вътрешните усилия и деформациите.
3. Въведено е понятието „**миграция на критичните сечения**“ като характеристика на изменението на зоните с максимално напрегнато състояние при промяна на статическата схема.

4. Разработена е методика за определяне на най-неблагоприятния конструктивен етап по време на реконструкция, която може да бъде използвана при анализа, проектирането и организацията на строителния процес.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chen, W.F., Duan, L. (Eds.). **Bridge Engineering Handbook**. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, 2014.
2. Barker, R.M., Puckett, J.A. **Design of Highway Bridges: An LRFD Approach**. 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, 2013.
3. Qin, S., Wei, K., Qin, J., Yuan, R., Xu, L., Dan, Q. **Stress-free-State Based Structural Analysis and Construction Control Theory for Staged Construction Bridges**. *Advances in Bridge Engineering*, Vol. 1, Article 1, 2020. <https://doi.org/10.1186/s43251-020-00001-y>.
4. Frangopol, D.M., Soliman, M. **Life-Cycle of Structural Systems: Recent Achievements and Future Directions**. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 12, No. 1, 2016, pp. 1–20.
5. EN 1991-2:2003+A1:2019. **Eurocode 1: Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges**. European Committee for Standardization, Brussels.
6. EN 1992-2:2005. **Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 2: Concrete Bridges**. European Committee for Standardization, Brussels.
7. fib. **Model Code for Concrete Structures 2010**. Fédération internationale du béton (fib), Lausanne, 2013.
8. **Shili Bridge Reconstruction Project**. Technical Documentation and Project Reports, Hunan Province, China.