

ПРАКТИЧЕСКА ОЦЕНКА НА ПОСЛЕДСТВИЯТА ОТ ПРОМЯНА НА СТАТИЧЕСКАТА СХЕМА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИЯ НА МОСТОВЕ

Доц. д-р Нели Димитрова Тризлова

Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – Варна

Абстракт: Реконструкцията на мостови конструкции често налага промяна на първоначалната статическа схема с цел повишаване на носимоспособността, експлоатационната надеждност и дълготрайността на съоръжението. Подобни конструктивни интервенции водят до съществено изменение на механичното поведение на конструкцията, като предизвикват преразпределение на вътрешните усилия, промяна на опорните реакции и деформациите. В настоящата статия е предложена методика за практическа оценка на последствията от промяна на статическата схема при реконструкция на мостове. Разгледани са основните видове конструктивни интервенции, водещи до промяна на статическата схема, и е анализирано тяхното влияние върху работата на конструкцията. Методиката е илюстрирана чрез пример за преобразуване на система от просто опрени греди в непрекъсната конструкция, а нейната практическа приложимост е потвърдена чрез анализ на реално изпълнена реконструкция на мост. Предложеният подход може да подпомогне инженерната оценка и избора на ефективни конструктивни решения при реконструкцията на мостови съоръжения.

Ключови думи: мостови конструкции; реконструкция; статическа схема; непрекъсната конструкция; вътрешни усилия; огъващи моменти; конструктивни интервенции; инженерна оценка.

PRACTICAL ASSESSMENT OF THE CONSEQUENCES OF STRUCTURAL SYSTEM CHANGES DURING BRIDGE RECONSTRUCTION

Assoc. Prof. Dr. Neli Dimitrova Trizlova

Varna Free University “Chernorizets Hrabar” – Varna

Abstract: Bridge reconstruction frequently requires modifications to the original structural system in order to improve load-carrying capacity, serviceability, and long-term structural performance. Such interventions significantly affect the mechanical behavior of the structure by redistributing internal forces, altering support reactions, and changing deformation patterns. This paper presents a practical methodology for assessing the consequences of structural system changes during bridge reconstruction. The main types of

structural interventions leading to changes in the structural system are examined, and their influence on the structural response is discussed. The proposed methodology is demonstrated through the transformation of a simply supported bridge into a continuous structure. Its practical applicability is further verified using a real bridge reconstruction project in which expansion joints were eliminated and the individual spans were integrated into a continuous structural system. The proposed approach provides engineers with a systematic framework for evaluating the effects of structural system modifications and supports the selection of effective reconstruction solutions for bridge structures.

Keywords: *bridge reconstruction; structural system; structural intervention; continuous bridge; internal forces; bending moments; structural assessment; bridge engineering.*

1. Въведение

Мостовите съоръжения са проектирани за определени експлоатационни условия, които с течение на времето често се изменят вследствие на увеличаване на транспортните натоварвания, промяна на нормативните изисквания, функционално преустройство или необходимост от възстановяване на конструкцията [4]. В много случаи необходимите характеристики не могат да бъдат постигнати единствено чрез локално усилване на отделни конструктивни елементи. Тогава се налага промяна на статическата схема, която представлява целенасочено инженерно решение за подобряване на механичното поведение на носещата система [1].

Промяната на статическата схема позволява по-благоприятно преразпределение на вътрешните усилия, намаляване на огъващите моменти и деформациите в критичните сечения, по-равномерно натоварване на носещите елементи и по-ефективно използване на носимоспособността на конструкцията. Този подход се прилага при реконструкции, свързани с обединяване на отвори в непрекъснати системи, добавяне или премахване на опори, промяна на конструктивните връзки, подмяна на лагерни устройства или изпълнение на нови носещи елементи, които изменят начина на работа на конструкцията [3].

Независимо от предимствата си, промяната на статическата схема води до изменение на механичното поведение на цялата конструкция. Изменят се вътрешните усилия, опорните реакции, деформациите и положението на критичните сечения, като новите напрегнати състояния могат да възникнат и в участъци, които не са

непосредствено засегнати от реконструкцията. Поради това оценката на подобни интервенции не следва да се ограничава единствено до проверка на реконструирания елементи, а трябва да обхваща цялата носеща система.

В инженерната практика липсва единна последователност за оценка на последствията от промяната на статическата схема при реконструкция на мостове. Често конструктивните проверки са насочени към отделни елементи, без предварителен анализ на влиянието на новата статическа схема върху общото механично поведение на конструкцията.

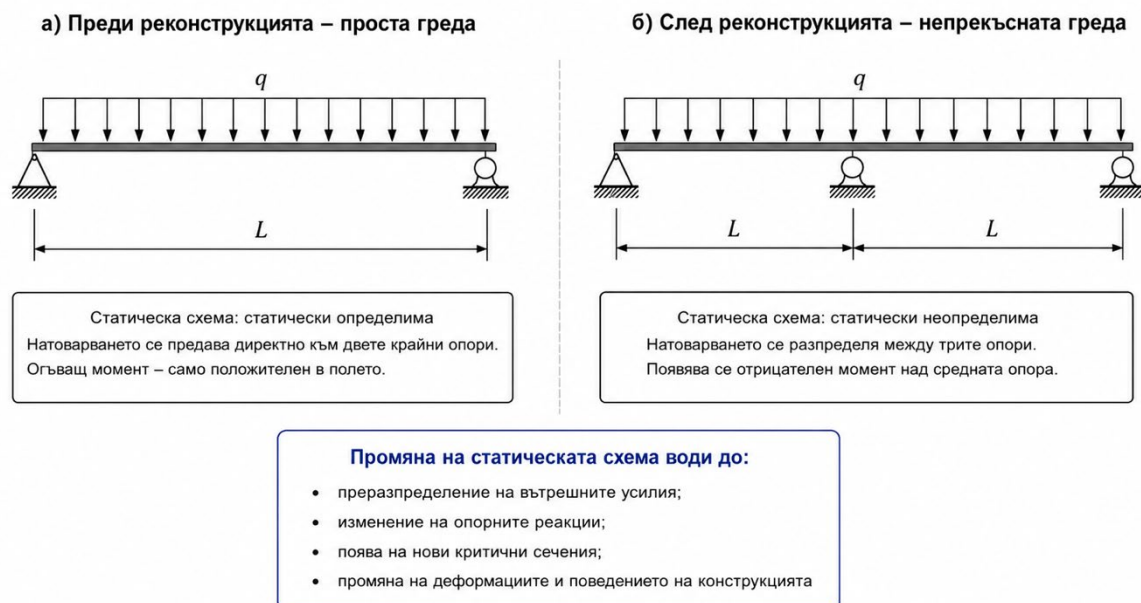
Целта на настоящата статия е да предложи практическа методика за оценка на последствията от промяна на статическата схема при реконструкция на мостови конструкции. Методиката се основава на последователен анализ на първоначалната и изменената статическа схема, определяне на промените в механичното поведение и оценка на необходимите конструктивни проверки. Нейното приложение е илюстрирано чрез пример за реконструкция на мост, при която промяната на статическата схема води до съществено преразпределение на вътрешните усилия.

2. Статическа схема и механично поведение на мостовите конструкции

2.1. Понятие за статическа схема

Статическата схема представлява идеализиран механичен модел на мостовата конструкция, чрез който реалната носеща система се заменя с изчислителен модел, отразяващ геометрията на конструкцията, вида и разположението на опорите, конструктивните връзки между отделните елементи и начина на предаване на външните натоварвания. Тя определя условията на равновесие на конструкцията и служи като основа за определяне на вътрешните усилия, опорните реакции и деформациите [2].

При проектирането и анализа на мостове правилният избор на статическа схема е от съществено значение, тъй като именно тя определя начина, по който отделните конструктивни елементи работят съвместно като единна носеща система (фиг.1). Дори при еднакви геометрични размери, материали и натоварвания различните статически схеми могат да доведат до съществено различно механично поведение.



Фиг. 1. Промяна на статическата схема при реконструкция на мостова конструкция: а) проста греда; б) непрекъсната греда

2.2. Влияние на статическата схема върху механичното поведение

Статическата схема определя начина, по който външните натоварвания се преобразуват във вътрешни усилия и се предават към лагерите, опорите и фундаментите. От нея зависи разпределението на огъващите моменти, срязващите сили, нормалните усилия, опорните реакции и деформациите на конструкцията.

Например две конструкции с еднаква геометрия и еднакво натоварване могат да развият напълно различни вътрешни усилия единствено поради различия в статическата си схема. При проста греда максималните положителни огъващи моменти възникват в средата на отвора, докато при непрекъсната система част от усилията се преразпределят към междинните опори, където възникват отрицателни огъващи моменти. По този начин се изменят както напрегнатото състояние на отделните сечения, така и деформационната форма на цялата конструкция.

Следователно механичното поведение на мостовото съоръжение се определя не само от неговите геометрични характеристики и материал, но и от избраната статическа схема, която определя взаимодействието между всички носещи елементи.

2.3. Последствия от промяната на статическата схема

Когато в резултат на реконструкция се измени статическата схема, се променя и механичното поведение на конструкцията. Изменението не се ограничава само до зоната на извършената конструктивна интервенция, а оказва влияние върху работата на цялата носеща система.

Промяната на статическата схема води до преразпределение на вътрешните усилия, изменение на опорните реакции, промяна на деформациите и формиране на нови критични сечения. Възможно е да се появят напрегнати състояния в участъци, които преди реконструкцията не са били критични, както и да се измени натоварването върху отделни опори и фундаментни конструкции.

Поради тази причина при всяка реконструкция, водеща до изменение на статическата схема, първата инженерна задача е изграждането на нов изчислителен модел, който да отразява действителната работа на конструкцията след извършената интервенция. Само след анализ на новата статическа схема може надеждно да бъде оценена носимоспособността и експлоатационната годност на реконструираното мостово съоръжение.

Следователно всяка реконструкция, при която се изменя статическата схема на мостовата конструкция, изисква цялостна оценка на последствията от тази промяна. Анализът следва да обхваща не само реконструираните елементи, но и влиянието на новата статическа схема върху механичното поведение на цялата носеща система. Това налага прилагането на последователен подход, който да идентифицира промените в статическата схема, да оцени тяхното отражение върху вътрешните усилия, деформациите и критичните сечения и да подпомогне избора на подходящо конструктивно решение. Въз основа на тези принципи е разработена предложената в настоящата статия методика за оценка на последствията от промяна на статическата схема при реконструкция на мостови конструкции.

3. Конструктивни интервенции, водещи до промяна на статическата схема

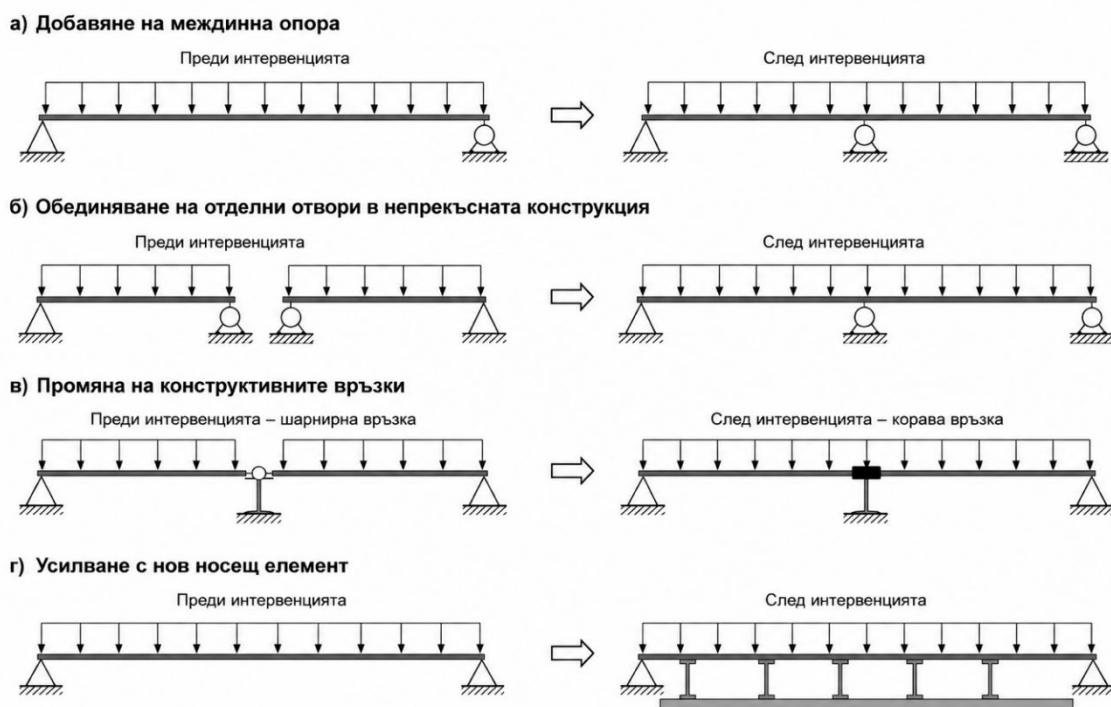
Реконструкцията на мостови конструкции може да включва различни конструктивни интервенции, които изменят начина на работа на носещата система. Докато при обикновените ремонтни дейности статическата схема обикновено се запазва, при

реконstrukциите често се изменят условията на опиране, конструктивните връзки или носещите елементи, което води до промяна в механичното поведение на конструкцията [6].

Промяната на статическата схема може да бъде резултат от една или от комбинация на няколко конструктивни интервенции. Независимо от конкретното техническо решение, общият резултат е промяна в начина на предаване на натоварванията и преразпределение на вътрешните усилия в носещата система.

Най-често срещаните конструктивни интервенции, водещи до промяна на статическата схема, са (фиг.2):

- **добавяне на нови междинни опори**, при което се намаляват разстоянията между опорите и се изменя разпределението на вътрешните усилия;
- **премахване или преместване на съществуващи опори**, което променя дължината на отворите и начина на работа на конструкцията;
- **обединяване на отделни прости отвори в непрекъсната система**, при което се изменя характерът на огъващите моменти и възникват отрицателни моменти над опорите;
- **промяна на конструктивните връзки**, например замяна на шарнирни връзки с корави или обратно, което води до различно разпределение на вътрешните усилия;
- **подмяна или изменение на лагерните устройства**, когато това променя възможностите за преместване и завъртане на конструкцията;
- **добавяне на нови носещи елементи**, които започват да поемат част от натоварването и изменят съвместната работа на конструкцията.



Фиг. 2. Основни конструктивни интервенции, водещи до промяна на статическата схема на мостова конструкция: а) добавяне на междинна опора; б) обединяване на отвори в непрекъсната система; в) промяна на конструктивните връзки; г) добавяне на нов носещ елемент

След извършване на подобни интервенции първоначалната статическа схема вече не описва реалното механично поведение на реконструираната конструкция. Това налага изграждането на нов изчислителен модел, чрез който да бъдат определени вътрешните усилия, деформациите и критичните сечения след реконструкцията. Поради тази причина първата стъпка при инженерната оценка е идентифицирането на настъпилата промяна в статическата схема, което служи като основа за последващия анализ на механичното поведение.

4. Методика за оценка на последствията от промяна на статическата схема

Промяната на статическата схема представлява една от най-съществените конструктивни интервенции при реконструкцията на мостови съоръжения, тъй като води до изменение на механичното поведение на цялата носеща система. Поради това инженерната оценка не следва да се ограничава до проверка на реконструираните елементи, а трябва последователно да проследи влиянието на новата статическа схема върху конструкцията като цяло.

В настоящата работа се предлага методика за оценка на последствията от промяната на статическата схема, основана на последователно изпълнение на пет основни етапа (фиг. 3).

4.1. Определяне на първоначалната статическа схема

Първият етап включва идентифициране на статическата схема на съществуващата мостова конструкция. Определят се геометрията на носещата система, разположението и видът на опорите, конструктивните връзки между отделните елементи и начинът на предаване на натоварванията. На тази основа се изгражда изчислителен модел, който описва механичното поведение на конструкцията преди реконструкцията.

4.2. Идентифициране на конструктивната интервенция

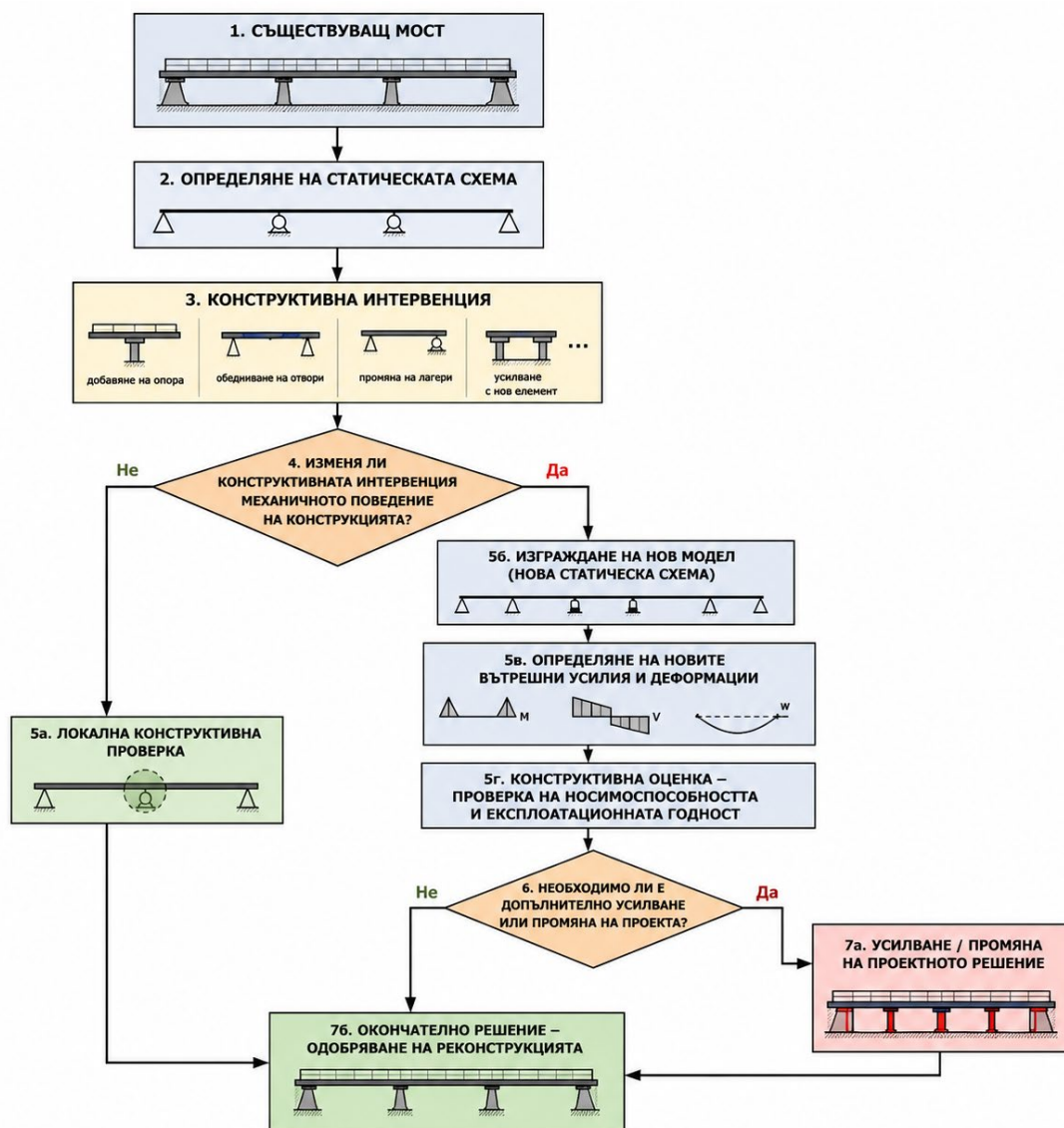
На втория етап се определя характерът на предвидената реконструкция и се анализира дали тя води до изменение на статическата схема. Установява се дали са налице промени в условията на опирание, конструктивните връзки, броя на отворите или носещите елементи, които могат да изменят начина на работа на конструкцията.

4.3. Изграждане на новата статическа схема

При наличие на промяна се разработва нов изчислителен модел, който отразява реалното конструктивно състояние след реконструкцията. Новата статическа схема трябва да отчита всички изменения в геометрията, конструктивните връзки, лагерните устройства и носещите елементи, тъй като именно тя определя последващото разпределение на вътрешните усилия.

4.4. Анализ на механичното поведение

Чрез новия изчислителен модел се определят вътрешните усилия, опорните реакции и деформациите след реконструкцията. Получените резултати се сравняват с тези за първоначалната конструкция, като се оценяват измененията в разпределението на огъващите моменти, срязващите сили, нормалните усилия, деформациите и положението на критичните сечения.



Фиг.3. Предложена методика за оценка на последствията от промяна на статическата схема при реконструкция на мостови конструкции

4.5. Инженерна оценка и избор на конструктивно решение

Последният етап включва инженерна оценка на получените резултати с оглед на носимоспособността, експлоатационната годност и безопасността на реконструираната конструкция [5]. При необходимост се предвиждат допълнителни конструктивни мерки за усилване или се избира алтернативно решение, осигуряващо по-благоприятно механично поведение.

Предложената методика позволява още на етапа на проектиране да бъдат идентифицирани последствията от промяната на статическата схема и да се оцени

тяхното влияние върху работата на конструкцията. Това създава възможност за избор на техническо решение, което осигурява необходимата надеждност, безопасност и експлоатационна годност на реконструираното мостово съоръжение.

Обобщение на предложената методика

Предложената методика може да се представи чрез следната последователност:

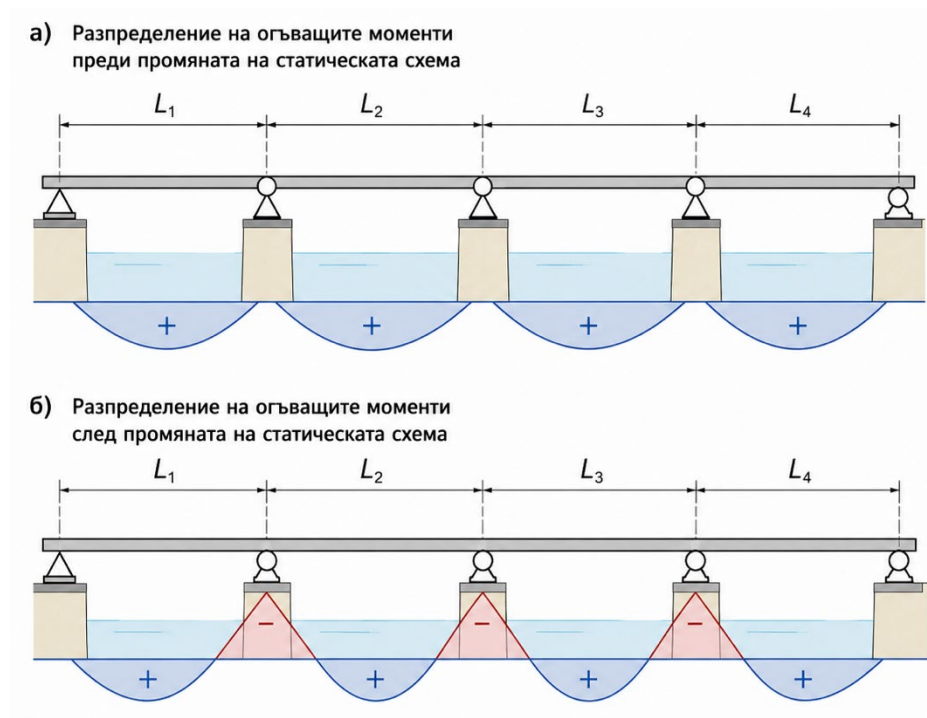
съществуваща схема → действителен път на усилията → механично описание на интервенцията → нова схема → нов път на усилията → сравнителен анализ → критични зони → строителни етапи → оценка на чувствителността → инженерно решение.

Основният принос на методиката е, че свързва локалната конструктивна интервенция с глобалната промяна в поведението на моста. По този начин реконструкцията се оценява не само чрез проверка на добавените или усилените елементи, а чрез проследяване на цялостното преразпределение на усилията от мястото на натоварване до фундаменти.

5. Практическо приложение на методиката при преобразуване на проста греди в непрекъсната конструкция

За илюстриране на предложената методика е разгледан пример за реконструкция на мостова конструкция, при която първоначалната статическа схема на две последователни прости греди е изменена в непрекъсната система. Подобна конструктивна интервенция се прилага при реконструкция на съществуващи мостове с цел подобряване на механичното поведение, намаляване на деформациите и повишаване на носимоспособността.

Първият етап от методиката включва определяне на първоначалната статическа схема (фиг. 4а). Конструкцията е изградена като две самостоятелно работещи прости греди, при които максималните положителни огъващи моменти възникват в средата на всеки отвор, а над опорите не се развиват отрицателни огъващи моменти.



Фиг. 4. Разпределение на огъващите моменти преди и след промяната на статическата схема

В резултат на реконструкцията двата отвора са конструктивно обединени в непрекъсната система (фиг. 4б), което води до промяна на статическата схема. Съгласно предложената методика е изграден нов изчислителен модел, отразяващ действителното конструктивно състояние след реконструкцията [7].

Извършеният анализ показва съществено изменение на механичното поведение на конструкцията. Част от положителните огъващи моменти в средата на отворите се преразпределят към междинната опора, където възникват отрицателни огъващи моменти (фиг. 4). Едновременно с това се изменят опорните реакции, деформационната форма и положението на критичните сечения. Получените резултати показват, че оценката на реконструкцията не може да бъде извършена само чрез проверка на усилените участъци, а изисква анализ на цялата носеща система.

За разглежданата идеализирана схема с четири еднакви отвора, постоянна огъвна коравина и равномерно разпределено натоварване максималните положителни огъващи моменти намаляват приблизително с 38% в крайните отвори и с около 71% във вътрешните отвори спрямо първоначалната статическа схема. Едновременно с това над междинните опори възникват отрицателни огъващи моменти, което показва, че

промяната на статическата схема не води до общо намаляване на вътрешните усилия, а до тяхното преразпределение в конструкцията.

Приложението на предложената методика позволява последователно да бъдат идентифицирани настъпилите изменения в статическата схема, да се оцени тяхното влияние върху механичното поведение на конструкцията и да се установи необходимостта от допълнителни конструктивни проверки или усилване. По този начин методиката подпомага избора на инженерно решение, което осигурява надеждна и безопасна експлоатация на реконструираното мостово съоръжение.

Разгледаният пример показва, че дори сравнително проста промяна на статическата схема води до съществено изменение на механичното поведение на мостовата конструкция. Това потвърждава необходимостта подобни реконструкции да бъдат оценявани чрез цялостен анализ на новата статическа схема, а не само чрез проверка на отделните реконструирани елементи.

За по-ясно онагледяване на влиянието на промяната на статическата схема върху механичното поведение на конструкцията е извършено количествено сравнение на максималните огъващи моменти преди и след реконструкцията. Представените стойности са изчислени за разглеждания идеализиран модел с четири еднакви отвора, постоянна огъвна коравина и равномерно разпределено натоварване и показват характерното преразпределение на вътрешните усилия при преминаване от система от просто опрени греди към непрекъсната конструкция. Резултатите са обобщени в таблица 1.

Таблица 1. Количествено сравнение на максималните огъващи моменти преди и след промяната на статическата схема

Показател	Преди реконструкцията	След реконструкцията
Максимален положителен момент в крайните отвори	100%	≈62%
Максимален положителен момент във вътрешните отвори	100%	≈29%
Отрицателен момент над междинните опори	0	Появява се

Потвърждаване на методиката чрез реален инженерен пример

Практическата приложимост на предложената методика може да бъде потвърдена чрез реконструкцията на **Shili Bridge** в провинция Фудзиен, Китай (фиг.5). Мостът представлява многопролетна стоманобетонна конструкция от съседно разположени кутиевидни греди, изпълнена първоначално като система от просто опрени отвори [8]. В процеса на експлоатация са установени характерни повреди, включително напукване в зоните на връзките между отворите, повреди на дилатационните фуги и влошаване на експлоатационните характеристики на съоръжението.

С цел повишаване на надеждността и дълготрайността на конструкцията е реализирана реконструкция, при която дилатационните фуги между отделните отвори са премахнати и мостът е преобразуван от система с просто опрени греди в непрекъсната конструкция. Тази конструктивна интервенция представлява типичен пример за целенасочена промяна на статическата схема с цел подобряване на механичното поведение на мостовото съоръжение.

При анализа на този пример ясно се проследяват етапите на предложената в настоящата работа методика. Първоначално е извършено обследване на съществуващото състояние и е определена изходната статическа схема. След това е идентифицирана конструктивната интервенция, водеща до промяна на начина на работа на носещата система, и е разработен нов конструктивен модел, отчитащ непрекъснатата работа на конструкцията. На тази основа е извършен анализ на механичното поведение и са оценени промените във вътрешните усилия, деформациите и работата на отделните конструктивни елементи.

Особено важно е, че след приключване на реконструкцията авторите извършват **статични и динамични натоварвания на реалния мост**, чрез които експериментално потвърждават работата на новата статическа схема и съответствието между проектния модел и действителното поведение на конструкцията. Получените резултати показват, че промяната на статическата схема води до подобряване на експлоатационните характеристики и надеждността на мостовото съоръжение.



Фиг.5. Основни етапи при реконструкцията на мостова конструкция чрез премахване на дилатационните фуги и обединяване на отделните отвори в непрекъсната конструкция: а) преди реконструкцията; б) по време на реконструкцията; в) след реконструкцията

Разгледаният пример потвърждава приложимостта на предложената методика при реални инженерни обекти. Последователното определяне на първоначалната статическа схема, идентифицирането на конструктивната интервенция, изграждането на нов изчислителен модел и анализът на механичното поведение позволяват надеждна оценка на последствията от промяната на статическата схема още на етапа на проектиране. Съвпадението между резултатите от анализа и проведените експериментални изпитвания потвърждава, че предложеният подход е приложим при реконструкция на съществуващи мостови конструкции.

6. Заключение

Реконструкцията на мостови конструкции често е свързана с конструктивни интервенции, които водят до промяна на статическата схема и съответно до изменение на механичното поведение на цялата носеща система. Извършеният анализ показва, че подобни промени не се ограничават само до реконструирания участък, а оказват влияние върху разпределението на вътрешните усилия, опорните реакции, деформациите и положението на критичните сечения в конструкцията.

В статията е предложена практическа методика за оценка на последствията от промяната на статическата схема, основана на последователно идентифициране на конструктивната интервенция, изграждане на нов изчислителен модел и анализ на механичното поведение на реконструираното мостово съоръжение. Методиката позволява още на етапа на проектиране да бъдат оценени последствията от предвидените конструктивни решения и при необходимост да бъдат предприети подходящи мерки за усилване или оптимизиране на проекта.

Практическият пример потвърждава, че дори сравнително ограничена промяна на статическата схема може да доведе до съществено преразпределение на вътрешните усилия и изменение на работата на конструкцията. Това показва, че надеждната оценка на подобни реконструкции изисква анализ на цялата носеща система, а не само проверка на отделните реконструирани елементи.

Предложената методика представлява последователна инженерна процедура, която обединява идентифицирането на конструктивната интервенция, изграждането на нов изчислителен модел и анализа на механичното поведение в единен алгоритъм за оценка на последствията от промяната на статическата схема.

Научният принос на настоящото изследване се състои в разработването на последователна инженерна методика за оценка на последствията от промяната на статическата схема при реконструкция на мостови конструкции. Методиката обединява идентифицирането на конструктивната интервенция, изграждането на нов изчислителен модел и анализа на механичното поведение в единна процедура за инженерна оценка.

Предложената методика оценява последствията от промяната на окончателната статическа схема след реконструкцията. Анализът на механичното поведение по време на отделните строителни етапи представлява самостоятелен инженерен проблем и е предмет на отделно изследване.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chen, W.-F., Duan, L. (Eds.). *Bridge Engineering Handbook*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 2014.
2. Hambly, E. C. *Bridge Deck Behaviour*. 2nd ed. E & FN Spon, London, 1991.
3. Ryall, M. J. *Bridge Management*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2010.

4. EN 1991-2:2003+A1:2019. *Eurocode 1: Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2019.
5. AASHTO. *LRFD Bridge Design Specifications*. 10th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2024.
6. Manning, D. G. *Bridge Rehabilitation*. Thomas Telford Publishing, London, 1999.
7. Freyermuth, C. L. Design of Continuous Highway Bridges with Precast, Prestressed Concrete Girders. *PCI Journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 14–39, 1969.
8. Xu, Z., Chen, B., Zhuang, Y., Tabatabai, H., Huang, F. Rehabilitation and Retrofitting of a Multispan Simply-Supported Adjacent Box Girder Bridge into a Jointless and Continuous Structure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 32, No. 1, Article 04017112, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001107.