

УДК 624.21.042.8

*КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук,
профессор,*

kaf_most@mail.ru

КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,

kaf_most@mail.ru

КОЛМАКОВ БОРИС ДМИТРИЕВИЧ, аспирант,

boriskolmakov@mail.ru

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

В статье впервые рассмотрены актуальные аспекты регулирования динамических характеристик, способствующие реальному представлению напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных пролетных строений в процессе их проектирования и расчета по предельным состояниям и долговечности. Рассмотрен и обоснован механизм взаимодействия динамических характеристик, а также поведение несущих элементов пролетных строений в процессе их работы при воздействии временных подвижных нагрузок, дано определение процессу автоматического регулирования.

Ключевые слова: спектр характеристик; пролетное строение; система «автомобиль + пролетное строение»; инерционность; регулирование.

VLADIMIR M. KARTOPOLTSEV, DSc, Professor,

kaf_most@mail.ru

ANDREI V. KARTOPOLTSEV, PhD, A/Professor,

kaf_most@mail.ru

BORIS D. KOLMAKOV, Research Assistant,

boriskolmakov@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,

2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

AUTOMATED CONTROL FOR DYNAMIC PARAMETERS OF BRIDGE SPANS

In the article, for the first time, actual aspects of the dynamic parameter control are considered. These parameters contribute to the real representation of the stress-strain state of steel-reinforced concrete span structures during their design and calculation by limiting states and durability. The paper describes a mechanism of the interaction between the dynamic parameters and the behavior of load-bearing elements of span structures during their operation under the live loads, and the process of automated control for dynamic parameters is defined.

Keywords: parameters; span structure; vehicle–span system; time delay; control.

Автоматическое регулирование динамической работы пролетных строений мостов представляет собой наиболее сложный и малоизвестный из всех

процессов работы мостовых сооружений под воздействием временной подвижной нагрузки. Этим и следует объяснять возникновение самостоятельно направленного, связанного с регулированием наряду со статическими и динамическими характеристиками пролетных строений. Возможность и целесообразность использования критериев частотных, амплитудных и других характеристик в процессе их автоматического регулирования доказывают на экспериментальном и теоретическом уровне дальнейшее совершенствование и обоснованность методики применения их в процессе проектирования и расчета мостовых сооружений [1].

С точки зрения анализа динамической работы пролетных строений такие критерии, как частота собственных и вынужденных колебаний, периоды, коэффициент динамической работы и затухания, являются не только оригинальными, но и многофункциональными. Устойчивая многофункциональность вновь выявленных динамических характеристик в рамках возможной аппроксимации явления, к примеру обычный или резонансный режим с учетом диссипации или без нее, открывает новое состояние предельных состояний на основе равновесия всей системы при статической и динамической работе [2, 3]. Это обстоятельство рассматривает круг критериев регулирования напряженно-деформированного состояния несущих элементов пролетных строений мостов при неблагоприятном режиме развития воздействия нагрузок. Таким образом, под автоматическим регулированием характеристик напряженно-деформированного состояния при динамическом воздействии временных подвижных нагрузок понимается поддержание одной или нескольких нормативных физико-механических характеристик, обеспечивающих требуемую работоспособность и долговечность мостового сооружения. Эту задачу можно осуществить лишь в условиях прогнозирования и поддержания значений регулируемых величин, используемых при проектировании и расчете пролетных строений по предельным состояниям. Таким образом, целесообразно говорить о замкнутом цикле автоматического регулирования динамических характеристик от проектирования до эксплуатации в реальных условиях движения транспортного потока [4].

С точки зрения динамических свойств автоматического регулирования существенными являются динамические свойства отдельных элементов или системы в целом, участвующие в процессе динамической работы и выполняющие функциональные требования в конструкции. Пролетное строение, являющееся объектом регулирования по совокупности, включает изменение ряда регуляторов напряженного состояния, определяемых прямым или косвенным путем от воздействия систем «автомобиль + пролетное строение» [5].

Задачей автоматического регулирования динамических характеристик пролетных строений является поддержание расчетных и эксплуатационных их значений, изменение и развитие которых осуществляется по определенным законам и не вступает в противоречие с показателями напряженно-деформированного состояния предельных состояний. Таким образом, регулируемые величинами являются частотные характеристики, периоды колебаний, параметры инерционности и демпфирования системы «автомобиль + пролетное строение», соответствующие виду деформирования, напряжения и усилия. Стабилизаторо-

рами процесса являются динамические напряжения, максимальный прогиб и предельные деформации [6].

Динамические свойства процесса регулирования определяются изменением параметров динамического процесса. Для безинерционной системы «автомобиль + пролетное строение», например при статическом приложении нагрузки, свойство состояния пролетного строения после регулирования характеристик напряженно-деформированного состояния представляется в виде

$$X = C \cdot X_i, \quad (1)$$

где X_i – исходная величина; X – выходная величина; C – коэффициент пропорциональности.

В случае, когда вся система инерционна:

$$X = C \cdot e^{pt}, \quad (2)$$

где e^{pt} – произвольная функция во времени, характеризующая возмущение системы.

Известно, что изменение амплитудно-частотных характеристик в системе взаимосвязано с углом сдвига по фазе колебаний (φ). Тогда уравнение (2) будет иметь вид [7]

$$X = A \cdot e^{(\omega_0 t + \varphi)}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота основного тона гармоники; A – амплитуда перемещения; φ – угол сдвига фазы в колебательном процессе.

Коэффициент Фурье (комплексный частотный спектр) находится по формуле

$$U = \frac{A}{2\pi \cdot n \cdot t} (1 - e^{-inx}). \quad (4)$$

Формула коэффициента Фурье в упрощенном виде

$$U = \frac{A}{2\pi \cdot n} \frac{1}{\omega}, \quad (5)$$

где ω – круговая частота высших гармоник; ω_0 – круговая частота основной гармоники.

Если $n = \frac{\omega}{\omega_0} \cong 1$, тогда

$$U = \frac{A}{2\pi \cdot n} \frac{1}{\omega} = \frac{A}{2\pi \cdot \omega}. \quad (6)$$

По результатам исследований и практических расчетов коэффициент Фурье U одинаково применим в оценочных действиях как нестационарного, так и стационарного воздействия возмущающей силы, которой является весь спектр подвижной временной нагрузки.

Представляя сталежелезобетонные балки пролетного строения моста контуром автоматического регулирования динамических характеристик, состоящим из несущих балок и железобетонной плиты проезжей части как пе-

редующих элементов, нужно обеспечить устойчивость в передаче колебаний от данного элемента структуры к другому. Для достижения цели автоматического регулирования динамических характеристик необходимо, чтобы в системе колебаний самих элементов и их связей появились параметры обратного воздействия, противодействующие прямому процессу колебаний [8]. Поэтому для каждой отдельной гармоники возмущения колебаний можно рассчитать процесс обратного воздействия в рамках системы регулирования в том случае, когда на сталежелезобетонную балку пролетного строения как на систему регулирования действует синусоидальное возмущение с комплексной амплитудно-частотной функцией и сдвигом фаз. Так, для характерного вида колебательного процесса сдвиг фаз характеризуется равенством

$$\operatorname{tg}(\omega t) = -\frac{\delta}{\omega}, \quad (7)$$

где $\omega t = \operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega} + k \cdot \pi$; δ – коэффициент затухания; ω – круговая частота; k – отношение следующих друг за другом амплитуд синусоидальной формы колебания.

Принимая в качестве критерия автоматического регулирования динамических характеристик добротность, регулируем процесс, который характеризуется двумя показателями:

– максимальным отклонением регулируемой величины от ее проектного заданного значения;

– продолжительностью процесса регулирования во времени.

Во всех случаях оба критерия должны быть минимальны, и степень неравномерности регулирования динамических характеристик целесообразно оценивать коэффициентом регулирования η , равным

$$\eta = \frac{1}{\mu g + \xi}, \quad (8)$$

где μg – динамическая добавка от системы возмущения, действующая на пролетное строение; ξ – коэффициент затухания для системы.

Исходя из условия, что ξ должен стремиться к большему значению, значение η будет тем больше, чем больше ξ для всей системы «автомобиль + пролетное строение». Рассматривая инерционность всей системы с возможным запаздыванием затухания составляющих элементов системы, условие, при котором процесс автоматического регулирования с прогнозируемым запаздыванием затухания, характеризуемый отношением $\frac{\delta}{\omega}$, будет представляться в виде равенства

$$\frac{\delta}{\omega} = e^{-\sqrt{P} \cdot T}, \quad (9)$$

где $P = -\delta + i\omega$ – смещение фаз; T – период колебания (форма колебания), i -форма гармоники.

В этом случае коэффициент затухания ξ равен

$$\xi = e^{\pi \sqrt{\frac{(1+\delta)^2}{\omega^2} - \frac{\delta}{\omega}}}, \quad (10)$$

где $e^{\pi} = 23,14$.

Автоматическое регулирование динамических характеристик в случае возможного отставания, т. е. наличия или отсутствия инерционности, характеризуется показателем инерционности, который, в свою очередь, регламентируется некоторыми параметрами временного отставания. Временное отставание связано с упругой или упругопластической работой системы «автомобиль + пролетное строение». Таким образом, временное отставание в виде инерционности может быть регулятором напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик.

В процессе автоматического регулирования динамических характеристик возможен пошаговый способ регулирования (подразумевается последовательность регулирования параметров – сначала ω , потом A , период колебаний и т. д., в конце $(1 + \mu g)$).

Особый интерес представляют способы регулирования характеристик – непрерывный или шаговый. Если шаговый способ регулирования возможен в определенном отрезке времени, то непрерывный способ подразумевает постоянное во временном отношении изменение напряженно-деформированного состояния, а вместе с ним и динамических характеристик, и регулирование осуществляется в зависимости от их значений для оценки их значимости в работе пролетных строений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ольденбург, Р.* Динамика автоматического регулирования / Р. Ольденбург, Г. Сарториус. – Л. : Гос. энергетическое изд-во, 1949. – 327 с.
2. *Картопольцев, А.В.* К вопросу о диссипативности деформирования балок пролетных строений мостов / А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков, М.В. Зголич // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 2. – С. 194–199.
3. *Картопольцев, В.М.* Применение резонансных методов определения динамических характеристик сталежелезобетонных мостов с учетом дефектов проезжей части / В.М. Картопольцев, А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков, А.Н. Щербинин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 4. – С. 126–134.
4. *Определение динамических напряжений и деформаций в сталежелезобетонных мостах* / В.М. Картопольцев, В.М. Сафронов, А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 3. – С. 194–204.
5. *Динамические испытания сталежелезобетонных мостов с учетом влияния дефектов проезжей части* / В.М. Картопольцев, Д. Кисов, А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 5. – С. 178–193.
6. *Картопольцев, А.В.* К вопросу о колебании системы «автомобиль + пролетное строение» при совпадении центров масс и жесткости / А.В. Картопольцев, Б.Д. Колмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 6. – С. 251–259.
7. *Картопольцев, В.М.* Влияние дефектов проезжей части на изменение динамических характеристик пролетных строений мостов / В.М. Картопольцев, А.В. Картопольцев,

Б.Д. Колмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 6. – С. 156–164.

8. Корнилов, Ю.Г. Основы теории автоматического регулирования / Ю.Г. Корнилов, В.Д. Пивень. – М.; Л. : Машгиз, 1947. – 308 с.

REFERENCES

1. Ol'denburg P., Sartorius G. Dinamika avtomaticheskogo regulirovaniya [Dynamics of automated control]. Leningrad: Gos. energeticheskoe izd., 1949. 327 p. (rus)
2. Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D., Zgolich M.V. K voprosu o dissipativnosti deformirovaniya balok proletnykh stroenii mostov [Dissipative deformation of bridge span beams]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 2. Pp. 194–199. (rus)
3. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D., Shcherbinin A.N. Primenenie rezonansnykh metodov opredeleniya dinamicheskikh kharakteristik stalezhelezobetonnykh mostov s uchetom defektov proezzhei chasti [Determination of dynamic properties of composite bridges with pavement defects using resonance methods]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 4. Pp. 126–134. (rus)
4. Kartopoltsev V.M., Safronov V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Opredelenie dinamicheskikh napryazhenii i deformatsii v stalezhelezobetonnykh mostakh [Stress-strain state of composite bridges]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 3. Pp. 194–204. (rus)
5. Kartopoltsev V.M., Kisov D., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Dinamicheskie ispytaniya stalezhelezobetonnykh mostov s uchetom vliyaniya defektov proezzhei chasti [Dynamic tests of composite bridges with pavement defects]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 5. Pp. 178–193. (rus)
6. Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. K voprosu o kolebanii sistemy «avtomobil'+proletnoe stroenie» pri sovpadenii tse ntrov mass i zhestkosti [Vehicle/span system oscillation at coincident centre of mass and stiffness]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 6. Pp. 251–259. (rus)
7. Kartopoltsev V.M., Kartopoltsev A.V., Kolmakov B.D. Vliyanie defektov proezzhei chasti na izmenenie dinamicheskikh kharakteristik proletnykh stroenii mostov [Effect of trafficway defects on dynamic properties of bridge spans]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 156–164. (rus)
8. Kornilov U.G., Piven' V.D. Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya [Fundamentals of automatic control theory]. Moscow; Leningrad: Mashgiz Publ., 1947. 308 p. (rus)