

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В
ИССЛЕДОВАНИИ ДЕФОРМАЦИЙ ВЫСОТНЫХ
СООРУЖЕНИЙ**

Чирва А.С., к.т.н.

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Макеевка, Украина*

Рассмотрены методы математического моделирования в исследовании металлических башенных и мачтовых сооружений с учетом комплексного влияния воздействующих факторов, что позволяет оптимизировать процессы контроля вертикальности высотных сооружений, их устойчивость и надежность.

Условия эксплуатации сооружений башенного и мачтового типов накладывают определенные требования к их прочности, надежности и долговечности, которые в сочетании с высокой стоимостью должны обеспечивать качественное выполнение своих функциональных задач.

Расчет высотных сооружений на динамические нагрузки начитывается с формирования соответствующих динамических моделей и различных воздействий. От структуры таких моделей и действующей на них нагрузок зависит качество и объективность выполненных расчетов. Полученные теоретические расчеты сравниваются с данными экспериментальных исследований или математических моделей, позволяющих проверить соответствие расчетных методов.

Многие методы расчета на динамические воздействия, часто основываются на упрощенных моделях, рассматривая сосредоточенные нагрузки в виде динамики точки или упругого стержня, что приводит к приближенным оценкам напряженного состояния конструкций или сооружений с которыми приходится мириться из-за отсутствия или сложности более строгих методов расчета и данных натурных исследований о динамических воздействиях на башенное сооружение. [2,4,5,6]

Вопрос устойчивости металлических башенных и мачтовых сооружений является важным как на стадии проектирования, так и при последующей эксплуатации. При моделировании высотного сооружения любой дискретной моделью, получают решение статических задач в виде алгебраических уравнений, а динамических – в виде дифференциальных уравнений, рассматривая этот процесс как стохастический. В

этом случае дискретные динамические модели требуют обработки матриц высокого порядка, что стало возможным с использованием современных вычислительных средств [1]. Достоверность результатов (выход), полученных расчетом, зависит как от качества моделирования сооружения (системы), так и от достоверности и качества модели динамических воздействий (входа), действующих на сооружение, особенно внешних условий. Прилагаемые нагрузки представляют собой случайное поле возмущений, математическое описание которых, в связи с комплексным воздействием, не всегда представляется возможным [3]. Учитывая, что башенное сооружение работает как пространственная система, прилагаемые нагрузки не подлежат управлению, ни по интенсивности, ни по направлению. При больших значениях таких воздействий башенное сооружение работает в неупругой стадии с образованием трещин и разрушением отдельных элементов. Это наблюдалось при испытании некоторых типов опор ЛЭП, башенных сооружений ветроэлектростанций, мачтовых сооружений под воздействием допредельных нагрузок (90% расчетных), что свидетельствовало об ошибках расчетной схемы сооружения на некоторые динамические воздействия. Вполне очевидно, что полученная информация о параметрах внешних воздействий путем моделирования или на основе натурных измерений, являются дополнительным резервом в расчетной схеме башенного сооружения, когда его прочность и надежность определяются конструктивными решениями, применяемыми материалами, устойчивостью и др. При нагрузках, близких к предельным в процессе испытаний высотное сооружение проходит все стадии от упругой деформации до предельного состояния, при которых может наступить разрушение.

Исследовать это состояние сооружения на всех стадиях его работы в процессе испытаний возможно с применением определенной методики измерений, соответствующих по точности приборов, способных дать информацию о непрерывном динамическом состоянии сооружения на всех этапах прилагаемых нагрузок.

Важное значение для исследования деформаций башенных сооружений и разработки автоматизированной системы имеет математическое моделирование деформационных процессов. Для построения таких моделей используются теоретико-вероятностные и статические методы. Первые предусматривают моделирование деформационного процесса в виде аналитических выражений, в которых учтены наиболее существенные исходные факторы. Статические методы позволяют строить модели в виде уравнений множественной регрессии, в которых некоторые факторы, не имеющие численной интерпретации учитыва-

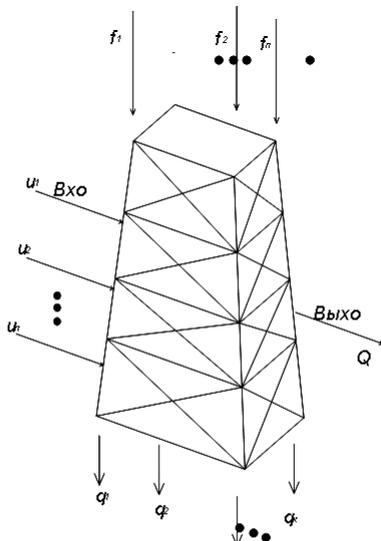


Рис. 1. Системный 3 к моделированию деформаций высотных сооружений

ных величин и случайных функций. Использование случайных величин дает возможность получить статистическую модель, а применение случайных функций позволяет построить динамические модели, более полно отражающие происходящие явления или процессы.

Важным этапом построения математической модели является оптимальный выбор форм связи, характеризующих зависимость точности исследований от воздействующих на них факторов, т.е. насколько адекватна будет построенная модель изучаемому объекту при заданной точности определения. Решение заключается в нахождении экстримума функций нескольких переменных, при определенных ограничениях. В этом случае исследуемое сооружение рассматривается как информационная система с данными $n+m$ на входе и с $K+I$ на выходе (рис 1.). Управление системой на входе осуществляется n -мерным вектором вида

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}, \quad (1)$$

кроме которой возможно влияние на систему неизмеряемых данных, имеющих место на входе в виде помех, определяемых m -мерным вектором

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}. \quad (2)$$

ются в совокупности с основными, имеющими численное выражение. Закономерность данных методов справедлива при значительных количествах исходной информации, т.е. при гауссовом распределении входных данных. Теоретические модели требуют экспериментальной проверки, которая может осуществляться в процессе стендовых или натуральных испытаний.

Вероятностные и статистические методы позволяют получить более объективную информацию о происходящих деформациях сооружений.

В зависимости от точности математического описания происходящих процессов, модели могут быть построены на уровне случай-

Геометрическая форма исследуемого сооружения с его размерами принимается за сложную систему, на которую могут воздействовать различные погрешности технологических операций и возможные помехи в виде деформаций (осадки, изгибы и кручения конструкций, температурные колебания, деформации от ветрового напора и гололеда и др.). О работе системы можно судить по изменениям проектных размеров в процессе приложения нагрузок, которые получают в процессе геодезических измерений. Тогда общая деформация сооружения равна

$$Q=Q(U,F). \quad (3)$$

На входе системы воздействуют прилагаемые нагрузки или внешние факторы. На выходе получают происшедшие деформации. Выходы модели q_1, q_2, \dots, q_n значения которых зависят от U и F , должны иметь определенные ограничения

$$q_j(U,F) \geq 0 \quad (j=1,2,\dots,k). \quad (4)$$

Решение задачи состоит в определении показателя качества процесса $Q(U)$, при условии возможной минимизации вектора управления U , удовлетворяющего наложенным ограничениям. Характер зависимости общей деформации башенного сооружения от точности исходных данных определяют линейность или нелинейность преобразующей системы. Примем на первом этапе систему линейного вида. Под преобразующей системой понимается совокупность факторов влияющих на данную систему. Для линейной преобразующей системы на основании принципа суперпозиции, каждая деформация от определенного фактора может рассматривается как линейная комбинация воздействующих факторов на входе:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= a_{1,0} + a_{1,1} \cdot x_1 + a_{1,2} \cdot x_2 + \dots + a_{1,n} \cdot x_n + b_{1,1} \cdot y_1 + b_{1,2} \cdot y_2 + \dots + b_{1,p} \cdot y_p \\ Z_2 &= a_{2,0} + a_{2,1} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + \dots + a_{2,n} \cdot x_n + b_{2,1} \cdot y_1 + b_{2,2} \cdot y_2 + \dots + b_{2,p} \cdot y_p \\ Z_m &= a_{m,0} + a_{m,1} \cdot x_1 + a_{m,2} \cdot x_2 + \dots + a_{m,n} \cdot x_n + b_{m,1} \cdot y_1 + b_{m,2} \cdot y_2 + \dots + b_{m,p} \cdot y_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В матричной форме уравнение (5) примет вид [100]:

$$Z = A_0 + AX + BY. \quad (6)$$

Данная система уравнений определяет состояние преобразующей системы, т.е. ее статистические свойства, в которой x_1, x_2, \dots, x_n – входные переменные преобразующей системы (исходные данные, включающие погрешность СМР, изготовления конструкций, геодезических измерений, деформации), а Z_1, Z_2, \dots, Z_m – выходные переменные, определяющие количественные характеристики исследуемого явления,

y_1, y_2, \dots, y_p – вторые исходные данные, относящиеся к преобразующей системе. Коэффициенты $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{mn}$ отображают влияние определенного фактора на общую величину деформации сооружения. Коэффициенты $a_{10}, a_{20}, \dots, a_{m0}$ – постоянные составляющие выходных переменных, определяющие влияние систематических погрешностей, присущих данной преобразующей системе. Применив к исходной системе (5) теорему о числовых характеристиках линейной функции нескольких независимых случайных аргументов, получим математическое ожидание и дисперсии выходных факторов.

$$M_Z = A_0 + AM_X + BM_Y, \quad (7)$$

$$D_Z = CD_X + FD_Y, \quad (8)$$

где M_Z, M_X, M_Y – матрицы столбцов, элементами которых являются соответственно математические ожидания выходных переменных Z_i , исходных факторов x_j и преобразующей системы y_k ; D_Z, D_X, D_Y – матрицы столбцов, элементами которых являются соответственно дисперсии выходных переменных Z_i исходных факторов x_j и преобразующей системы y_k ; C, F – матрицы, элементы которых определяются преобразованием дисперсий исходных факторов и преобразующей системы. В общем случае, когда влияющие факторы связаны корреляционной зависимостью, в формулы дисперсии вводится группа добавочных слагаемых, содержащих коэффициенты корреляции, тогда уравнения дисперсии примет вид

$$D_Z = CD_X + FD_Y + NK_{xx} + RK_{yy} + TK_{xy}, \quad (9)$$

где N – блочная матрица размером $m \times n$, осуществляющая преобразование корреляционных моментов $Kx_j x_m$ исходных факторов x_j и x_m при осуществлении элементарных операций в дисперсии выходных переменных Z_i ; K_{xx} – матрица размера $n \times l$, элементами которой являются корреляционные моменты $Kx_j x_m$ исходных факторов x_j и x_m ; R – клеточная матрица размером $m \times p$, преобразующая корреляционные моменты $Ky_k y_p$ исходных факторов y_k и y_p в дисперсии выходных переменных; K_{yy} – матрица размера $p \times l$, элементами которой являются корреляционные моменты; T – клеточная матрица размером $m \times n$, осуществляющая преобразование корреляционных моментов $Kx_j y_k$, исходных факторов электронных операций x_j и преобразующей системы y_k в дисперсии выходных переменных; K_{xy} – матрица размера $n \times l$, представляющая корреляционные моменты $Kx_j y_k$ ис-

ходных факторов элементарных операций x_j и преобразующей системы y_k .

Решение сводится к нахождению коэффициентов, входящих в уравнения (5). Полученная математическая модель деформаций сооружения реализуется в ходе испытаний или исследований с помощью ЭВМ. При решении вводятся в ЭВМ данные о всех факторах, влияющих на сооружение, его проектные размеры, ограничения в виде нормируемых отклонений. К таким параметрам относят:

- масса отдельных частей и всего сооружения;
- нагрузки в зонах стыков, узлов, а также дополнительные временные нагрузки от оборудования, используемого при испытаниях;
- ветровые нагрузки;
- солнечную радиацию и изменение температуры по высоте;
- неравномерные осадки основания и деформаций силового пола;
- гололедные и сезонные климатические воздействия;
- вибрационные и сейсмические воздействия.

Выводы

Определение воздействий перечисленных нагрузок является важнейшей задачей проводимых исследований высотных сооружений.

При построении динамических моделей, с целью получения объективной информации, необходимо выполнять одновременные измерения на входе динамической системы при проведении натурных исследований. Построение соответствующей динамической модели состоит из структурной и параметрической идентификации, полученных по данным геодезических измерений обобщающих все закономерности натурных исследований. Динамическая модель может служить основой для построения прогнозируемой ситуации, позволяющей находить по заданным значениям воздействующих факторов возможные деформации и оценивать точность их определения [3]. Методика определения влияния внешних факторов, учета степени их воздействия в процессе испытаний или натурных исследований может осуществляться как в экстраполяционной, так и в интерполяционной формах в начальный +методов достижения цели зависит от характера развития исследуемых процессов, структуры моделей и накопленного опыта прогнозного моделирования. На первом этапе это позволяет выбрать соответствующие геодезические приборы, на последующих осуществлять обоснование необходимой точности, методики математической обработки и разрабатывать оптимальную технологию измерений, когда интерполяционная форма прогнозирования может быть основной для разработки ав-

томатизированной системы учета влияния воздействующих факторов на исследуемое высотное сооружение. Данный подход был предложен и реализован в виде определенной концепции при испытании металлической опоры ЛЭП для горных условий Исландии.

Summary

The methods of mathematical modeling in the study of metal tower and mast structures considering the combined effect of influencing factors, optimizing control processes verticality high-rise structures, their stability and reliability.

Литература

1. Анненков А. А. Комплексный подход к исследованию деформаций высотных опор ЛЭП в процессе испытаний и эксплуатации : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.24.01 «Геодезия, фотограмметрия и картография» / А. А. Анненков. – К., 2002. – 16 с.

2. Егоров А. И. Обґрунтування точності геодезичних робіт при будівництві і експлуатації споруд баштового типу на основі напружено-деформованого стану: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / А. И. Егоров. – К.: КНУБА, 2001. –20 с.

3. Лобов М. И. Применение математического моделирования при исследовании деформаций высотных сооружений / М. И. Лобов, А. А. Анненков // Вестник ДонГАСА. - 2000. - Вып.11(21). - С.123-126.

4. Лобов М. И. Условия обеспечения качества строительства и надежной эксплуатации высотных сооружений башенного и мачтового типов. М.И. Лобов, А.С. Чирва, А. Н. Переварюха // Вісник Дон-НАСА. - 2011.- Вип.1(87). - С. 105-111.

5. Староверов В. С. Обоснование выбора мест и расчет точности наблюдений за деформациями инженерных сооружений (на примере сооружений башенного типа) / В. С. Староверов, А. И. Егоров // Инж. геодезия. - 1991. - Вип.34.

6. Черняга П. Г. Комплексний підхід до вивчення результатів спостережень за рухами споруд та земної поверхні / П. Г. Черняга // Вісник геодезії та картографії. - 1999. - №3.- С. 13-15.