

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ СПОСОБЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗАВОДСКОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Приводятся принципы разработки вероятностных алгоритмов оценки надежности железобетонных конструкций на стадии изготовления. Показана эффективность нового способа контроля качества сборных железобетонных конструкций, заключающегося в ежесменной интегральной оценке их надежности с помощью ЭВМ по разработанным программным комплексам. Этот способ контроля позволяет учитывать изменчивость технологического процесса и его влияние на потребительские свойства продукции.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, надежность, вероятностная модель, неразрушающие методы контроля.

В ходе производства сборных железобетонных конструкций основной задачей является обеспечение их эксплуатационной пригодности при минимальных затратах. Оценка надежности серийного выпуска конструкций выполняется по результатам выборочных испытаний отдельных конструкций на контрольную нагрузку согласно ГОСТ 8829–94. Но принятая схема оценки эксплуатационной пригодности изделий имеет ряд отрицательных сторон: высокая стоимость проведения натурных испытаний, отсутствие связи между значениями контрольного коэффициента, числом испытаний, риском заказчика, требуемым уровнем показателя надежности и т.д. Естественно, что эти испытания не могут быть достоверными, поскольку не учитывают изменчивость технологического процесса, который существенно влияет на потребительские свойства выпускаемой продукции.

В связи с этим появляется потребность в неразрушающих методах контроля качества конструкций, которые позволили бы оценить надежность и пригодность последних к нормальной эксплуатации, не разрушая их, и при этом учесть случайный характер технологических и конструктивных параметров. Учитывая эти обстоятельства, на комбинате «Братскжелезобетон» и на кафедре строительных конструкций Братского государственного университета был предложен автоматизированный способ оценки надежности сборных железобетонных конструкций с применением ЭВМ, который осуществляется ежесменно.

Главным условием для использования автоматизированного способа контроля конструкций является наличие разработанных программ по оценке их надежности, реализующих вероятностные алгоритмы. В качестве исходных данных в ЭВМ вводятся параметры технологического процесса с учетом их изменчивости, которые контролируются ежесменно и накапливаются в соответствующих файлах данных, затем производится их статистическая обработка и расчет надежности по основной программе. Этот способ контроля обобщает влияние изменчивости технологических факторов на свойства конструкций и, как показали проведенные исследования [1, 2], является более

надежным и достоверным по сравнению с выборочными испытаниями силовым нагружением.

Для оценки показателя надежности конструкций по результатам производственного контроля отдельных показателей качества (компонент) используются расчетные модели, например, согласно нормам проектирования железобетонных конструкций (СНиП 2.03.01-84*), расчет по прочности и трещиностойкости нормальных и наклонных сечений, а также по жесткости. Под показателем надежности конструкций в данной работе понимается вероятность их безотказной работы при кратковременных испытаниях. Согласно выполненным исследованиям по оценке начальной надежности, математические модели большинства железобетонных конструкций (плит, балок, ферм и др.) для каждого предельного состояния с достаточной степенью точности аппроксимируются линейными зависимостями [3]. Анализ большого массива контролируемых технологических параметров показывает, что характер их распределения подчиняется нормальному закону. К этим параметрам относятся физико-механические характеристики материалов, геометрические размеры конструкций, величина преднапряжения арматуры. При проведении контроля по отдельным показателям качества согласно соответствующим стандартам необходимо проверять признаки нормальности распределения контролируемых характеристик.

Условие надежности конструкций при испытаниях по первой группе предельных состояний можно представить в виде

$$Z_1 = Z_1(X_1, \dots, X_{n1}) \geq Z_{01},$$

для второй группы предельных состояний – в виде

$$Z_2 = Z_2(X_2, \dots, X_{n2}) \leq Z_{02},$$

где Z_{01}, Z_{02} – некоторые детерминированные контрольные параметры, задаваемые в соответствии с нормативно-технической документацией: значения несущей способности (для первой группы предельных состояний), деформаций, ширины раскрытия трещин (для второй группы предельных состояний); X_i – случайные независимые

* - автор, с которым следует вести переписку

переменные, определяющие функции предельного состояния Z_1 и Z_2 .

Запишем в общем виде функцию предельного состояния:

$$Z = Z(X),$$

где $X = (x_1, \dots, x_m)$ – вектор независимых случайных аргументов размерности m .

Тогда функция распределения для $Z(X)$ может быть подсчитана как:

$$P(Z < Z_0) = \int_{Z < Z_0} f(x) dx, \quad (1)$$

где Z_0 – нормативное значение контролируемого параметра; $f(x)$ – совместная плотность распределения случайного вектора X ; $Z < Z_0$ – область интегрирования.

Функционал (1) определяет вероятность безотказной работы конструкции по второй группе предельных состояний. Вероятность безотказной работы конструкции по первой группе предельных состояний определяется функционалом:

$$P = 1 - P(Z < Z_0) = \int_{Z > Z_0} f(x) dx. \quad (2)$$

Таким образом, вероятностная постановка задачи состоит в нахождении точечных и интервальных оценок функционалов (1) и (2) по результатам испытаний для каждой случайной независимой переменной $X_i, i = 1, m$. Выполнив соответствующие преобразования, получаем формулу для определения показателя надежности конструкции по I группе предельных состояний:

$$H_I = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{m_Z - Z_0}{\sigma_Z}\right) \geq P_{T1},$$

по II группе предельных состояний:

$$H_{II} = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{Z_0 - m_Z}{\sigma_Z}\right) \geq P_{T2},$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ – функция Лапласа;

m_Z, σ_Z – математическое ожидание и среднеквад-

ратическое отклонение случайной величины, которые определяются расчетом по вероятностному алгоритму с учетом статистической изменчивости отдельных компонентов, т.е. технологических факторов; P_{T1}, P_{T2} – нормативные уровни надежности по I и II группам предельных состояний.

Назначение требуемых величин уровней надежности для разных критериев эксплуатационной пригодности отдельных конструкций является важным вопросом, поскольку от этого зависит материалоемкость конструкций. Исследования, проведенные на комбинате «Братскжелезобетон» совместно с ЦНИИСК, показали, что для основных несущих конструкций эти величины назначаются следующими:

– при оценке надежности по прочности $P_T = 0,9986$;

– по прочности бетона при отпуске натяженной напрягаемой арматуры $P_T = 0,95$;

– по жесткости и трещиностойкости $P_T = 0,90$.

Разработка вероятностного алгоритма может выполняться методом линеаризации функции и методом статистического моделирования (Монте-Карло). При использовании расчетной модели норм проектирования железобетонных конструкций (СНиП 2.03.01-84*) целесообразнее применять метод линеаризации функций. Несмотря на его громоздкость при разработке вероятностного алгоритма, этот метод дает возможность получить значение коэффициентов весомости (значимости) всех технологических параметров, которые определяют первую и вторую группы предельных состояний. Эти коэффициенты позволяют управлять технологическим процессом. Например, при недостаточной надежности конструкции по какому-либо показателю можно легко установить, за счет какого параметра ее можно повысить. Коэффициенты весомости параметров при оценке надежности ребристых плит представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты весомости параметров ребристых плит при определении изменчивости прочности, жесткости и трещиностойкости

Показатели	Предельное состояние			
	по прочности		по жесткости	по трещиностойкости
	бетона при обжатии	нормального сечения		
R_b	0,47	0,018	–	–
E_b	–	–	0,087	0,137
R_s	–	0,353	–	–
E_s	–	–	0,0435	0,078
A_s	0,0085	0,184	0,054	0,120
h	0,0086	0,323	0,118	0,086
b_f	0,0053	0,00003	0,106	0,008
b	0,0012	–	0,066	0,104
h_f	0,0025	–	0,033	0,100
a	0,0032	0,232	0,145	0,094
σ_{sp}	0,50	–	0,343	0,390

Определение статистических характеристик входных параметров контроля может производиться по результатам малой ежесменной выборки или генеральной совокупности с использованием интервальной оценки на базе накопленной априорной информации по каждому показателю (принимается худший результат). Определение статистических характеристик для каждого отдельного показателя качества предполагает:

- вычисление несмещенных выборочных оценок для математического ожидания и дисперсии;

- проверку однородности дисперсии;
- вычисление параметров априорного распределения по мере накопления информации.

После определения статистических характеристик всех контролируемых показателей производится оценка надежности конструкций по программам, реализующим вероятностные алгоритмы [4, 5, 6]. Это является основанием для ежесменной приемки выпускаемой продукции и ее паспортизации (см. блок-схему на рис. 1).

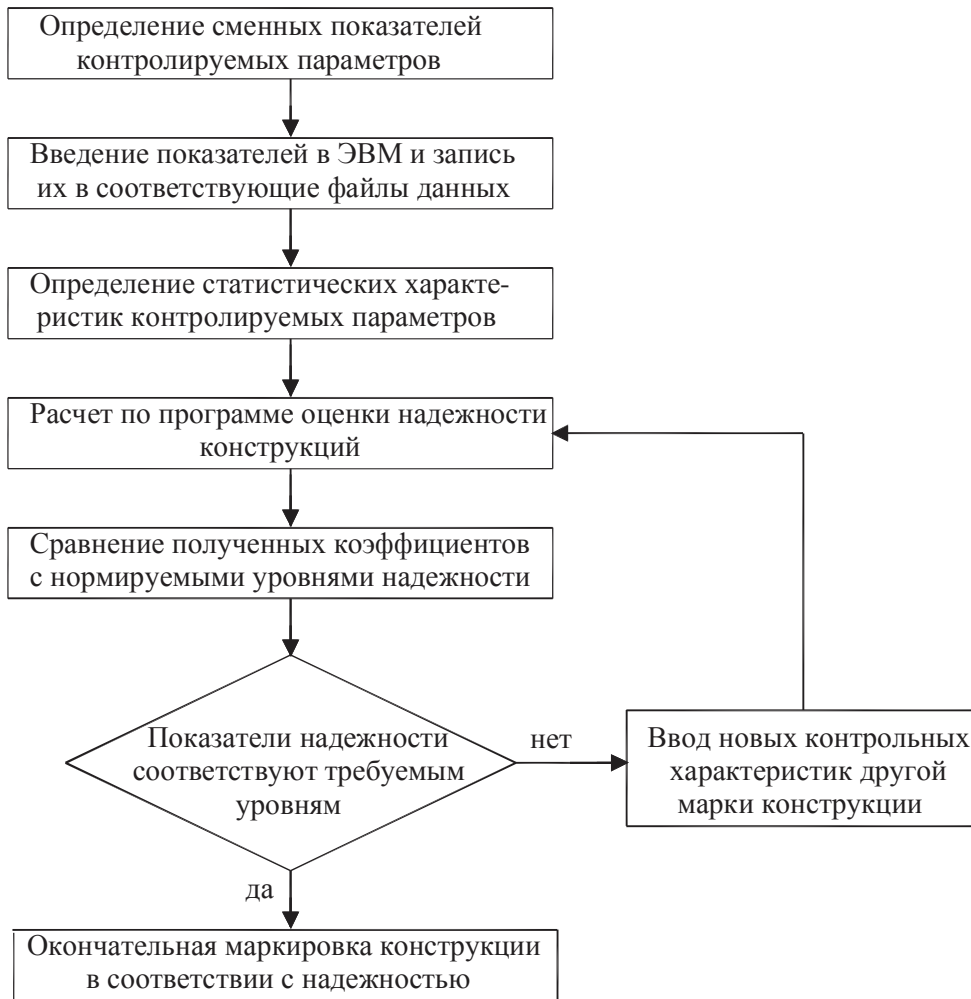


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной оценки надежности конструкций

Внедрение ежесменного автоматизированного способа оценки эксплуатационной пригодности конструкций позволяет:

- снизить объем дорогостоящих натуральных испытаний конструкций в 6...10 раз, обеспечив тем самым экономическую эффективность и целесообразность этого способа, что особенно актуально в современных условиях рыночной экономики при выпуске сборных железобетонных конструкций мини-заводами ЖБИ, не оснащенными испытательными полигонами и цехами;

- оперативно выявлять резервы снижения материалоемкости и решать производственные задачи по оптимизации конструкций, что дает также значительный экономический эффект;

- создать предпосылки для автоматизированного управления всем технологическим процессом.

У предприятия-изготовителя появляются научно обоснованные критерии:

- состояние технологического процесса;

– очередность задач совершенствования технологических показателей;

– выявление резервов материалоемкости и возможность самостоятельного решения всех вопросов по своей продукции.

Разработанные пакеты программ [4, 5, 6] по вероятностной оценке надежности плит (PLATTE), балок (BALKA), ферм (NADFER) могут быть также использованы проектировщиками и научными работниками. Эти пакеты программ зарегистрированы в Роспатенте и прошли апробацию на комбинате «Братскжелезобетон».

Литература

1. Самарин, Ю.А. Резервы надежности и долговечности железобетонных конструкций заводского изготовления / Ю.А. Самарин, Г.В. Коваленко, М.Т. Орлов. – М.: Информэнерго, 1988. – 44 с.

2. Дудина, И.В. Обеспечение качества сборных железобетонных конструкций на стадии изготовления /

И.В. Дудина, А.Г. Тамразян // Жилищное строительство. – 2001. – № 3. – С. 8–10.

3. Чирков, В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В.П. Чирков. – М.: Маршрут, 2006. – 620 с.

4. Коваленко, Г.В. Пакет программ по оценке надежности железобетонных балок покрытия / Г.В. Коваленко, И.В. Коваленко, В.С. Анучин / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 960249. – М.: РосАПО. – 1996.

5. Коваленко, Г.В. Пакет программ по оценке начальной безотказности плит покрытий и перекрытий заводского изготовления / Г.В. Коваленко, И.В. Коваленко, К.В. Куликов / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 960307. – М.: РосАПО. – 1996.

6. Калаш, О.А. Оценка надежности железобетонных ферм с учетом физической нелинейности материалов (NADFER v. 1.00) / О.А. Калаш, В.С. Шпаков / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008611566. – М.: Роспатент. – 2008.