

УДК 624.072.33

## **Программный комплекс расчета пространственной размерной цепи для металлических стержневых конструкций**

**Югов А.М., д.т.н., Бондарев А.Б.**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Украина

**Анотація.** У статті запропоновано математичну модель методу генерації великопрогонових стрижньових систем будь-якої форми з урахуванням дефектів виготовлення та послідовності зведення. Розроблено обчислювальний комплекс для розмірного аналізу стрижньових конструкцій на основі математичної моделі, що пропонується. Обчислювальний комплекс, що пропонується, може бути використаний при реальному проектуванні великопрогонових стрижньових металевих конструкцій. Загальна форма об'єктів, що проектується, може бути різноманітна: циліндрична, сферична, еліптична, тороїдальна, конічна та інша.

**Аннотация.** В статье предложена математическая модель метода генерации большепролётных стержневых систем любой формы с учётом дефектов изготовления и последовательности возведения. Разработан вычислительный комплекс для размерного анализа стержневых конструкций на основе предложенной математической модели. Предлагаемый вычислительный комплекс может быть использован при реальном проектировании большепролётных стержневых металлических конструкций. Общая форма проектируемых объектов может быть разнообразна: цилиндрическая, сферическая, эллиптическая, тороидальная, коническая и другая.

**Abstract.** In the article the mathematical model of the method for generation of large-span beam systems of any form is proposed, taking into account manufacturing defects and construction sequence. The computer system for dimensional analysis of beam structures is developed based on the proposed mathematical model. Proposed computing system can be used for real designing the large-span core metal structures. The general form of designed objects can be varied as cylindrical, spherical, elliptical, toroidal, conical and other one.

**Ключевые слова:** большепролётные металлические пространственные покрытия, математическое моделирование процесса сборки, размерная цепь, сборочные погрешности, компьютерная программа.

**Введение.** На сегодняшний день, по сведениям авторов, ни одна компьютерная программа не позволяет выполнить расчет пространственной размерной цепи для пространственных стержневых конструкций. В то же время, без применения персонального компьютера осуществить такие расчеты становится затруднительным, а во многих случаях – невозможным. Величины отклонений узлов характеризуют уровень точности возведения сооружения, а точнее – уровень собираемости [3], от которого зависит его стоимость и надёжность.

**Постановка проблеми.** Для правильного назначения допускаемых отклонений необходимо выполнить расчёт собираемости и оценить напряжённо-деформированное состояние, в результате чего предложить меры по ограничению сборочных усилий или допускаемых отклонений, если такие будут необходимы. В настоящее время используются два подхода к оценке сборочных погрешностей конструкций, состоящих из большого количества элементов:

- на основе выявления размерных связей в конструктивно-технологической схеме конструкции, составления размерных цепей и решения уравнений точности – расчёт точности [4];
- на основе статического расчёта стержневой системы методом Мора, позволяющего определить перемещения узлов по заданным деформациям стержней [15].

Использование этих подходов для оценки погрешностей сборки, к примеру, несущих сетчатых оболочек покрытий и других пространственных стержневых конструкций, сопряжено с существенными недостатками:

- вследствие многосвязности системы не удаётся составить адекватные технологической схеме сборки размерные цепи, поэтому результаты такой оценки будут некорректными;
- метод Мора, с одной стороны, не отражает реальной картины погрешностей, так как базируется на неразрывности деформаций в узлах, и, с другой стороны, не учитывает способ и последовательность сборки конструкций, что тоже приводит к неверному результату;
- оба способа не учитывают возможность корректировки пространственного положения элементов во время монтажа.

**Анализ исследований и публикаций.** Сегодня существуют мощные CAD (Computer-Aided Design) пакеты машиностроительного направления. Они предлагают модули, позволяющие выполнить размерный анализ сборки узлов и агрегатов конструкций. Среди наиболее известных CAD пакетов можно отметить Solid Works, SIGMUND Works [1]; Autodesk Inventor [12]; Pro/ENGINEER [10]; CETOL 6 Sigma [17]; Kompas-3D V-12 [14]. Все известные мощные CAD пакеты аналогичны друг другу. Принципиальных различий в них нет, тем более, в части модуля размерного анализа. Рассмотрим функциональные возможности модулей размерного анализа на примере программы Solid Works [1].

Во всех программах твердотельного моделирования требуется создание 3D-модели, что позволяет по назначенным допускам определить размер замыкающего звена. В результате каждого исследования для замыкающего размера становятся известны: номинальное значение; минимальный и максимальный допуски (наихудший случай); минимальный и максимальный

RSS-допуск (квадратный корень из суммы квадратов); контрибуция – относительная степень участия элемента в размерной цепи и его влияние на замыкающее звено (%). Размеры цепи и граничные условия по монтажу определяются между гранями и кромками CAD-модели, что позволяет измерять зазор (натяг) между поверхностями по фактическому минимальному расстоянию [11].

Однако создание 3D-модели в программе представляет собой трудоёмкий процесс, но даже не эта сложность заставляет отказаться от применения программ твердотельного моделирования при выполнении расчёта собираемости в нашем случае. Вторая причина – отсутствие возможности расчёта пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями. По сути, в модули заложена методика [4] для расчёта пространственной размерной цепи. Третья причина – невозможность создавать сборку из дефектных стержней, то есть, с отклонениями длин элементов. При создании такой конструкции возникает программный конфликт, который не позволяет выполнить сборку дефектной системы.

В работе А. В. Анкина и Д. Л. Кузьминского [2] отмечается, что «... на сегодняшний день ни одна программа не позволяет произвести расчет пространственной размерной цепи. В то же время без применения ЭВМ произвести такие расчеты становится затруднительным...». Такой вывод делают авторы и других работ [7, 8, 16].

А. В. Анкин совместно с Д. Л. Кузьминским для решения этой задачи разработали программный комплекс РПРЦ (расчет пространственной размерной цепи). Данный комплекс построен по модульному принципу: модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования – от чертежа, расчета и моделирования проектируемого оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. Модули программы РПРЦ состоят из таких общеизвестных пакетов прикладных программ, как Nastran, MatLab, Solid Works. Однако, по утверждению авторов, программа всё же направлена на решение вопроса собираемости узлов и агрегатов машиностроительной отрасли (двигатели, шатуны, поршневые группы, ГРМ [газораспределительный механизм]), и для анализа собираемости многоэлементных систем их разработка не подходит.

Программа для расчёта линейной модели пространственной размерной цепи объекта производства, предложенная С. В. Исаевым [7], также не позволяет выполнить расчёт собираемости многоэлементной стержневой системы. В своей программе С. В. Исаев для расчёта цепи добавлял новую систему координат, а раз так, то результат расчёта – реальные координаты для узла – не привязан к проекту жестко, задавать малые отклонения узлов

вообще не имеет смысла. Т. е. для анализа собираемости многоэлементных систем с одной системой координат программа С. В. Исаева, к сожалению, не подходит (по информации программы и его научного руководителя Л. А. Кашубы).

**Не решенные ранее части общей проблемы, которые отражены в исследовании.** Необходимо заметить, что программный код всех известных программ, в том числе и авторских, является закрытым, то есть, получить доступ к нему просто невозможно в силу вполне понятных причин. Из всего, что изложено выше, возникает необходимость создания специальной программы, которая позволит решить задачу расчёта собираемости пространственных стержневых конструкций на основе известных математико-геометрических процедур, используемых при решении геодезических задач [11, 13].

Возможно, существуют программные реализации, позволяющие выполнить размерный анализ пространственной размерной цепи с несколькими замыкающими звеньями, основанные на предлагаемых математических процедурах, но из-за того, что таковых обнаружено не было, а также из-за отсутствия доступа к некоторым программам, например, на судостроительном заводе ООО «Северная верфь» в г. Санкт-Петербурге, РФ, или самолётостроительном холдинге ОАО «Компания «Сухой», можно утверждать, что их нет. К сожалению, из-за трудностей в понимании данные работы азиатскими специалистами (КНР, Япония) не проанализированы. Результаты исследований азиатских специалистов, видимо, обладают высокой научной ценностью и значимостью.

**Изложение основного материала исследования.** Цель работы – предложить вычислительный комплекс для размерного анализа стержневой системы (плоской и пространственной), который позволит численно смоделировать процесс монтажа сооружения с учётом отклонений длин стержней. Для решения этой задачи был разработан пакет прикладных программ в виде вычислительного комплекса размерного анализа стержневых конструкций – ВК РАСК [3]. Структура данного комплекса представлена на рис. 1. Пакет прикладных программ для моделирования замыкающих величин создан с помощью системы программирования Delphi 7 и предназначен для работы под управлением операционной системы Windows.

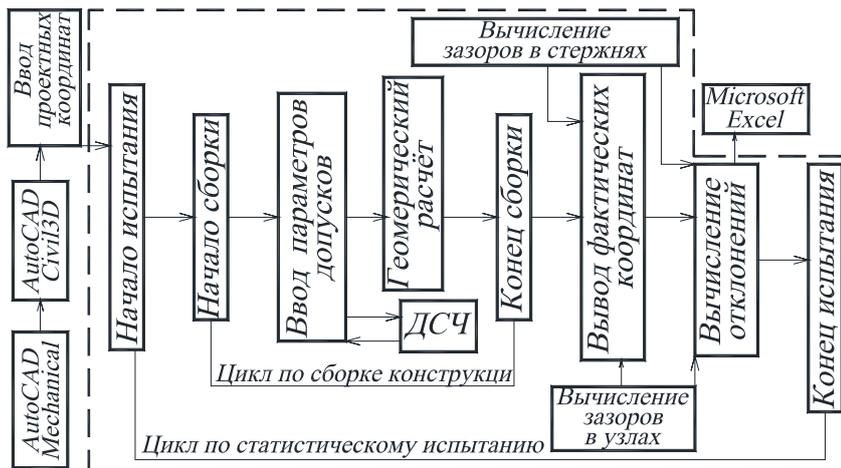


Рис. 1. Блок-схема ВК PASK

Данный комплекс построен по модульному принципу: модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования – от чертежа, расчета и моделирования проектируемого оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. Количество процедур геометрического расчёта в ВК PASK соответствует числу решаемых отдельных задач по вычислению координат одного или нескольких узлов. Геометрический расчёт сооружения в целом выполняется по аналогии с методом конечных элементов (МКЭ). Задача численного определения возможных погрешностей возведения больше-пролётной пространственной стержневой системы решена путём её геометрического моделирования монтажа (сборки) с учётом точности отдельных элементов. Решение задачи выполняется в несколько этапов:

- разбиение сооружения на монтажные блоки в соответствии с конструктивно-технологической схемой монтажа;
- вычисление проектных координат узлов сооружения, являющихся контактными при сопряжении монтажных элементов или блоков;
- моделирование сборки элементов блоков или элементов с учётом случайных отклонений их геометрических параметров от номинальных значений;
- моделирование монтажа (установки) блоков или элементов действительной геометрической формы в сооружении согласно принятой технологической схеме;
- анализ отклонений узлов действительной геометрической формы сооружения от номинального положения или по отношению друг к другу.

Характерной особенностью ВК РАСК является то, что он позволяет определить размеры замыкающего звена цепи на основе стохастического моделирования величин отклонений отдельных элементов в соответствии с технологической схемой возведения конструкции. То есть, в его основе лежит вероятностный метод решения задачи нахождения номинального значения и величины линейного допуска замыкающего звена размерной цепи при известных номинальных значениях и допусках составляющих звеньев.

Однократное построение действительной формы сооружения (1 цикл сборки) основан на решении геометрических задач, цель которых – нахождение действительных координат отрезков (стержней). Впервые такой геометрический подход разработан в геодезии при построении геодезических сетей триангуляции, разбивке земельных участков [13].

Результаты формирования действительной геометрии (пространственной размерной цепи) могут быть использованы в решении задач анализа и синтеза размерной цепи. При построении расчётной схемы между элементами, участвующими в расчёте размерной цепи, назначаются необходимые геометрические процедуры, определяющие технологическую взаимосвязь между элементами.

В результате расчета формируется отчет, в котором представлены:

- гистограммы распределения вероятности, с которой замыкающее звено попадёт в заданный интервал;
- характеристики закона распределения – стандартное отклонение, вероятность;
- гистограммы оценки качества и степени влияния составляющих звеньев размерной цепи на замыкающее звено;
- исходные данные по участвующим в расчёте размерам модели.

Решение такой задачи актуально на раннем этапе конструирования изделия, когда технологические особенности подготовки производства конкретного изделия мало проработаны. Пригодится он и на заключительном этапе конструкторского процесса в качестве инструмента для заключительной поверки и в целях разработки оптимальной технологии. Для проведения анализа допусков предусмотрено два принципиально различных аналитических инструментальных средства для расчета отклонений цепи: анализ на максимум-минимум и статистический анализ. Для выполнения статистического анализа погрешностей при сборке предусмотрено несколько возможных законов распределения: нормальный, равномерный, Симпсона, экспоненциальный. Кроме того, существует режим «нет отклонений», «предельные погрешности», «заданные погрешности». Предельные погрешности – анализ по методу «максимум-

минимум». Заданные погрешности – анализ погрешностей сборки на основе выполнения реальных замеров длин стержней элементов, выполненных на заводе металлоконструкций.

Исходная информация для вычислительных процедур записывается в целочисленные массивы, состоящие из совокупности координат узлов, номеров узлов и стержней, описывающих положение стержня в общей технологической схеме сборки. Характер решаемой задачи в ВК РАСК определяется четырьмя типами режимов расчёта. Каждый из режимов одного типа может сочетаться с каждым режимом другого типа.

К первому типу относятся режимы работы, которые определяют поэтапное накопление данных для статистической оценки погрешностей. Программа позволяет выполнять расчёт как в один, так и в несколько этапов, необходимость которых зависит от решаемой задачи.

Ко второму типу режимов относятся режимы исследования, которые определяют вид погрешностей в качестве предмета анализа: зазоров узлов от номинального положения; разностей отклонений между различными узлами; отклонений в расстояниях между узлами.

Здесь в качестве критерия оценки отклонений приняты такие статистические характеристики как математическое ожидание  $m$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ . К третьему типу режимов относятся режимы монтажа:

- монтаж блоков без дополнительной корректировки их положения на монтажном (проектном) уровне;
- монтаж с корректировкой действительного положения блоков (элементов) относительно проектного;
- монтаж любой части конструкции от стержня или от узла как в прямом порядке стержней, так и в обратном;
- монтаж с корректировкой положения элементов относительно ранее смонтированной части сооружения.

К четвёртому режиму относится задание отклонений: для всех стержней; фиксирование действительных координат узлов без каких-либо дополнительных перемещений смонтированных частей; только для стержней, параллельных одному из векторов глобальной системы координат.

Статистическое исследование отклонений при сборке стержневой системы. Пространственные стержневые системы в большинстве случаев собираются из отдельных элементов, каждый из которых представляет отдельный стержень, ферму или балку. В результате накопления погрешностей при сборке стержневой системы происходит отклонение её действительного очертания от номинального. Такое отклонение оценено

по радиальним ( $\delta R$ ), тангенціальним ( $\delta T$ ) і меридиональним ( $\delta M$ ) зміщенням вузлів. За позитивне напрямлення відхилень прийнято напрямлення від центра кривизни для  $\delta R$  і по годинній стрелці для  $\delta T$ .

Учитывая, что с вероятностной точки зрения возможная действительная форма стержневой системы является случайным событием, под испытанием подразумевается её однократное численное построение, т. е. сборка.

Отклонения узлов оболочки определяются совокупностью большого количества действительных значений геометрических расчётных параметров её монтажных элементов. Следовательно, опираясь на центральную предельную теорему теории вероятностей, можно ожидать, что распределение случайных отклонений звеньев оболочки будет приближаться к нормальному закону [8, 9].

Очевидно, что в случае отсутствия систематических погрешностей математическое ожидание  $m_i$  отклонений звеньев стержневой системы в общем случае равно нулю. Поэтому основной характеристикой случайной величины отклонения звена (стержня или узла) будет являться его среднеквадратическое значение  $s_i$ . Всякое вычисленное по данным выборки объёма  $n$  значение  $s_i$  является приближённой оценкой истинного значения  $\sigma_i$ , причём отличие между ними будет тем меньше, чем больше  $n$ . Можно сказать, что для вычисления среднеквадратического отклонения  $\sigma$  с относительной погрешностью  $0,05\sigma$  и надёжностью  $\gamma = 0,95$  необходимо использовать выборку объёмом 662 испытания (однократных построений) стержневой системы [8].

### **Выводы**

Предлагаемая методика моделирования возведения стержневой системы с учётом дефектов изготовления и монтажа максимально приближена к процессу реального накопления погрешностей при возведении сооружений и имеет преимущества по сравнению с другими известными способами определения возможных начальных отклонений. Она позволяет:

- исследовать погрешности возведения сооружений любой конструктивной формы и степени сложности независимо от вида их статической определимости;
- учесть способ возведения сооружения, последовательность монтажа и укрупнительную сборку его конструкций;
- учесть перемещения смонтированных частей сооружения от постоянных нагрузок в процессе возведения;
- предусмотреть возможность корректировки пространственного положения конструктивных частей или блоков во время монтажа;

- оценить влияние сборочных напряжений на несущую способность возводимого объекта при проектировании;
- наряду со статическим расчётом по методу Мора исследовать возможные искажения геометрической формы пространственных сооружений.

Разработанный алгоритм геометрического моделирования монтажа большепролётных стержневых систем в вероятностной постановке с последующим анализом погрешностей, реализованный в ВК РАСК [3], позволяет исследовать возможные погрешности возведения большепролётных металлических конструкций различных конструктивных схем и способов возведения, а также других пространственных сооружений.

### **Литература**

- [1] Алямовский А. А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / [А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
- [2] Анкин А. В. Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи / А. В. Анкин, Д. Л. Кузьминский // Известия МГТУ «МАМИ» : раздел 2 : Технология машиностроения и материалы. – 2011. – № 2, том 12. – С. 106–110.
- [3] Бондарев А. Б. Компьютерная программа «Вычислительный комплекс «Размерный анализ стержневых конструкций» («ВК РАСК») / А. Б. Бондарев, А. М. Югов // Свидетельство о регистрации авторских прав на компьютерную программу № 47952. – Государственная служба интеллектуальной собственности Украины. – 2013. – 2 с.
- [4] Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски : ГОСТ 21779-82. – М. : Издательство стандартов. – 1983. – 14 с.
- [5] Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчёт точности : ГОСТ 21780-2006. – М. : МГС. – 13 с.
- [6] Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности : ГОСТ 21780-2006 – М. : МГС. – 13 с.
- [7] Исаев С. В. Модели геометрии машин в анализе точности / С. В. Исаев // Компьютерная хроника. – 2000. – № 8. – С. 5–18.
- [8] Кашуба Л. А. Алгоритм моделирования реальной геометрии детали [Электронный ресурс] / Л. А. Кашуба // Системный анализ в науке и образовании : электронный научный журнал. – Дубна. – 2011. – № 3. – URL: <http://www.sanse.ru/archive/19>. – 0421100111\0018.

- [9] Корн Г. Справочник по математике : для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн – М. : Высшая школа. – 1977. – 832 с.
- [10] Минеев М. А. PRO/ENGINEER WILDFIRE 2.0/3.0/4.0 : самоучитель / М. А. Минеев, Р. Г. Прокди – СПб. : Наука и Техника. – 2008. – 352 с.
- [11] AutoCAD Civil 3D 2009. Руководство пользователя / Autodesk, Inc. – San Rafael, CA : Autodesk, 2008. – 2452 с.
- [12] Autodesk Inventor®. Series-10. Основные принципы : руководство пользователя / Autodesk, Inc. – San Rafael, CA : Autodesk, 2005. – 302 с.
- [13] Начало работы в MicroSurvey CAD 2010: руководство пользователя / MicroSurvey Software Inc.– Westbank, BC : Standard & PLUS, 2011. – 248 с. – (MicroSurvey STAR\*NET. Версия 7.0. Программа для уравнивания геодезических сетей по методу наименьших квадратов).
- [14] КОМПАС-3D V12. Руководство пользователя / ЗАО АСКОН. – М. : АСКОН, 2012. – 416 с.
- [15] Смирнов А. Ф. Строительная механика. Стержневые системы / А. Ф. Смирнов, А. В. Александров, В. Я. Лашененков. – М. : Стройиздат. – 1981. – 512 с.
- [16] Шаломеенко М. А. Размерный анализ в Solid Works / М. А. Шаломеенко // САПР и графика. Инструменты АРМ. – 2010. – № 10. – С. 40–42.
- [17] SETOL 6σ. Mechanical Variation Management System. Basic Training Manual. Version 6.0 / Sigmetrix, LLC. – McKinney, TX : Sigmetrix, 2002. – 200 p.

*Надійшла до редколегії 15.04.2013 р.*