

В. Л. ТКАЛИЧ, Р. Я. ЛАБКОВСКАЯ, О. И. ПИРОЖНИКОВА

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ САПР УПРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ ГЕРКОНОВ

Обсуждается вопрос формирования библиотеки конечных элементов для САПР современных конструкций герконов в целях создания защитных сигнализационных систем. Приведены данные по истории развития разработок и производства герконов.

Ключевые слова: герконы, конечные элементы, упругие чувствительные элементы, САПР, защитные сигнализационные системы.

Несмотря на почти 40-летнюю историю применения значение магнитоуправляемых герметизированных контактов (герконов) как элементов коммутационной техники не снижается. Мировой рынок герконов достаточно стабилен, им практически нет замены во многих отраслях промышленности и народного хозяйства.

Достоинства и простота конструкции герконов, способность управлять внешним магнитным полем (созданным электрическим током или постоянным магнитом) позволяют применять их в качестве контактных пар всевозможных реле, концевых выключателей, тумблеров, кнопок клавиатуры, датчиков положения, скорости и ускорения, индикаторов перемещения и распределения сигналов, преобразователей неэлектрических величин в электрические аналоги, элементов высокочастотных и измерительных систем спецтехники, защитных сигнализационных систем и т.п.

Ведущими производителями герконов на мировом рынке являются фирмы ОКІ (Япония), Hamlin (США), Standex (Великобритания), Philips, С. Р. Clare, Fujitsu (Япония), Gunther (Германия), Aleph Nippon (Япония), Рязанский завод металлокерамических приборов (Россия).

Статичность объемов производства герконов в мире связана с рядом их неоспоримых качеств, таких как: полностью герметизированный металлический контакт, в связи с чем герконы могут работать в условиях повышенной влажности и запыленности, в агрессивных средах, при температурах от -60 до $+150$ °С; малая мощность управления (50 — 200 мВт); низкое электрическое сопротивление ($0,05$ — $0,2$ Ом); высокое сопротивление изоляции (10^{10} — 10^{12} Ом); быстродействие ($0,5$ — $1,5$ мс); полная гальваническая развязка цепей управления и нагрузок; большой срок службы (106 — 108 переключений) [1].

Производство герконов, как правило, является высокоавтоматизированным, прецизионным, требующим высокой квалификации обслуживающего персонала и специального технологического оборудования, что связано с необходимостью разработки САПР герконовой язычковой и мембранной элементной базы.

Формирование библиотеки конечных элементов в приложении к плоским и мембранным упругим чувствительным элементам (УЧЭ) датчиков систем управления позволит применять данную элементную базу при создании высоконадежных и конкурентоспособных защитных сигнализационных систем.

В настоящее время наиболее широко применяются модифицированный элемент с пятью степенями свободы в узлах и изопараметрический элемент с 36 степенями свободы в узлах, относящиеся к четырехугольным элементам пластин и оболочкам.

Рассмотрим элемент первого типа: в системе криволинейных ортогональных координат в каждом узле вектор его обобщенных узловых перемещений имеет пять компонент — три компоненты вектора перемещений и два угла поворота, т.е.

$$\{U\}^T = [u_1 u_2 u_3 \vartheta_1 \vartheta_2].$$

Углы поворота определяются по формулам

$$\vartheta_1 = \frac{1}{r} \frac{\partial u_3}{\partial \phi} - \frac{u_2}{R_2}; \quad \vartheta_2 = \frac{\partial u_3}{\partial s} + \frac{u_1}{R_1},$$

где s , ϕ — меридиональная и окружная криволинейные координаты срединной поверхности оболочки; R_1 , R_2 — главные радиусы кривизны; r — радиус оболочки в сечении, перпендикулярном оси вращения.

В общем случае элемент представляет собой произвольный четырехугольник на срединной поверхности оболочки. Для формирования определяющих характеристик элемента используется нормализованная система координат ξ , η , на которую отображается четырехугольник.

Криволинейные ортогональные координаты s , ϕ и произвольная осесимметричная поверхность задаются в системе координат ξ , η формулами:

$$\begin{aligned} \phi &= \sum_{i=1}^4 L_i(\xi, \eta) \phi_i; \\ s &= \sum_{i=1}^4 L_i(\xi, \eta) s_i; \\ r &= \sum_{i=1}^4 H_i(\xi, \eta) r_i + \sum_{i=1}^4 H_{1i}(\xi, \eta) \left(\frac{\partial r}{\partial \xi} \right)_i + \sum_{i=1}^4 H_{2i}(\xi, \eta) \left(\frac{\partial r}{\partial \eta} \right)_i, \\ z &= \sum_{i=1}^4 H_i(\xi, \eta) z_i + \sum_{i=1}^4 H_{1i}(\xi, \eta) \frac{\partial z}{\partial \xi} + \sum_{i=1}^4 H_{2i}(\xi, \eta) \frac{\partial z}{\partial \eta}. \end{aligned}$$

Здесь $L_i(\xi, \eta)$ — билинейные полиномы Лагранжа; $H_i(\xi, \eta)$, $H_{1i}(\xi, \eta)$, $H_{2i}(\xi, \eta)$ — кубические функции Эрмита; s_i , ϕ_i , r_i , z_i — узловые значения аппроксимируемых функций.

Аппроксимирующие функции имеют следующий вид:

$$L_i = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i);$$

$$H_i = \varphi_1(\xi)\varphi_1(\eta); \quad H_{1i} = \varphi_1(\eta)\varphi_2(\xi); \quad H_{2i} = \varphi_1(\xi)\varphi_2(\eta);$$

$$\varphi_1(\lambda) = \frac{1}{4}(2 + 3\lambda_0 - \lambda_{30}); \quad \varphi_2(\lambda) = \frac{1}{4}(\lambda_{30} + \lambda_{20} - \lambda_0 - 1);$$

$$\lambda_0 \rightarrow \xi_0, \eta_0; \quad \xi_0 = \xi\xi_i; \quad \eta_0 = \eta\eta_i; \quad \lambda_i \rightarrow \xi_i, \eta_i,$$

где ξ_i, η_i — узловые значения нормализованных координат.

Для оболочки с произвольной формой меридиана главные радиусы кривизны R_1, R_2 определяются согласно известным соотношениям дифференциальной геометрии с учетом того, что $r = r(s), z = z(s), \frac{dr}{ds} = \cos \theta, \frac{dz}{ds} = \sin \theta$ (θ — угол между осью вращения z и нормалью к срединной поверхности оболочки).

Использование аппроксимации обеспечивает плавные изменения на границах сопрягаемых элементов радиусов r, R_1, R_2 . Производные по нормализованным координатам в узловых точках определяются по формуле

$$\left(\frac{\partial q}{\partial \lambda}\right)_i = \left(\frac{\partial q}{\partial s}\right)_i \left(\frac{\partial s}{\partial \lambda}\right)_i, \quad \lambda \rightarrow \xi, \eta, \quad i = 1, \dots, 4.$$

Для оболочек канонической формы можно определять радиусы кривизны и их производные по известным зависимостям.

Для приведения общей матрицы жесткости к одной размерности с матрицей преобразования координат необходимо вводить фиктивный угол поворота узлов элемента вокруг нормали. Для этого вводится шестое узловое перемещение — угол поворота υ_{zi} , тогда расширение блоков матрицы жесткости $[K_{ij}]$ осуществляется по закону:

$$K_{ij}^1 = \begin{cases} \gamma E h \Delta, & i = j; \\ -\frac{1}{3} \gamma E h \Delta, & i \neq j, \end{cases}$$

где E — модуль упругости материала, h — толщина слоя многослойной оболочки, так что элемент остается самоуравновешенным в локальной системе координат; изменение коэффициента γ в диапазоне $3 \cdot 10^{-3} \leq \gamma \leq 3 \cdot 10^{-1}$ практически не оказывает влияния на конечный результат.

Недостатками описанного элемента являются необходимость введения фиктивного угла поворота υ_{zi} при сборке ансамбля конечных элементов, а также низкий порядок аппроксимации тангенциальных перемещений и, как следствие, сравнительно низкая точность определения внутренних силовых факторов [2].

В этом смысле более перспективными представляются конечные элементы изопараметрического типа, простейшим из которых является криволинейный четырехугольник с девятью степенями свободы в узле. В общем случае границы элемента могут не совпадать с линиями кривизны. В качестве узловых неизвестных конечного элемента принимаются девять величин — три компоненты вектора перемещения и их первые производные по координатам произвольной криволинейной системы координат:

$$\{U\}^T = \left[u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_2} u_2 \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} u_3 \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_1} \frac{\partial u_3}{\partial \alpha_2} \right],$$

где $u_i, i = 1, 2, 3$, — составляющие вектора перемещений в локальной системе координат, связанной с координатными линиями; $\alpha_i, i = 1, 2, 3$, — координатные линии.

При сборке ансамбля в узловых точках компоненты вектора перемещений одного из элементов выбираются в качестве основных. Компоненты узлового вектора перемещений

примыкающей оболочки выражаются через основные исходя из условий сопряжения оболочек. С повышением порядка производных в векторе обобщенных узловых перемещений выполняется последовательное повышение порядка точности аппроксимации поля перемещений. Соответственно может быть повышена точность аппроксимации геометрии оболочки.

При выборе конечных элементов стержней, составляющих единый ансамбль с базовыми конечными элементами пластин и оболочек, необходимо обеспечить идентичный выбор вектора обобщенных узловых перемещений и аппроксимирующих функций [3], с тем чтобы обеспечить выполнение общих требований к конечным элементам.

Таким образом, сформирована библиотека конечных элементов УЧЭ герконов для САПР магнитоуправляемых устройств. Показано, что при использовании моментной схемы конечных элементов повышается точность расчетов деформаций и напряжений магнитоуправляемых УЧЭ герконов на 5—7 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карabanов С. М., Майзельс Р. М., Шоффа В. Н. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе. Справочное руководство. М.: Интеллект, 2011. 432 с.
2. Ткалич В. Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления. Монография. СПб: СПб ГИТМО(ТУ) 2000. С. 100.
3. Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И. Метод повышения надежности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматики // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 1(71). С. 136—138.

Сведения об авторах

- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru
- Римма Яновна Лабковская** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования и безопасности
компьютерных систем

Поступила в редакцию
06.03.12 г.