

УДК 621.757

*Пасечник В. А., Хмуренко А. А.***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».**
Украина, г. Киев

МЕТОДИКА АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ СБОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Предложена методика анализа и оценки пространственных размерных цепей, которая базируется на стохастическом моделировании предварительно сформированной и синтезированной размерной цепи, которая учитывает специфические конструктивно-технологические параметры сборных конструкций из ПКМ. Структурная модель представлена в виде систем и подсистем связанных систем координат, связи в которых позволяют описать особенности технологий изготовления составных частей из ПКМ и дальнейшей сборки конструкции в целом.

Ключевые слова: оценка размерной цепи; стохастическое моделирование; сборная конструкция из ПКМ.

Введение

На сегодняшний день, использование инновационных материалов в сложных, сборных конструкциях требует актуализации имеющихся методик и средств анализа и обеспечения параметров их качества, как объектов сборки. Так, для определения точности геометрических параметров собираемых конструкций широко используемым инструментом является размерно-точностный анализ, который основывается на аппарате теории размерных цепей (РЦ).

Данная теория, имеет значительное количество допущений в отдельных положениях, как правило, касающихся представления составных частей (СЧ) объектов сборки и непосредственно связей между ними. Для сборных конструкций из сложно-структурированных полимерных материалов, вышеуказанные допущения вносят достаточно высокую погрешность как на этапах формирования и синтеза РЦ, так и на этапах их последующего анализа и оценки.

Современные методики анализа и оценки ПРЦ для сборных конструкций

Анализ РЦ позволяет решить, так называемую, обратную задачу, в которой по установленным номинальным размерам и допускам составляющих величин можно рассчитать замыкающую величину. Искомые значения сравниваются с заданными в конструкторской документации, и в случае расхождения вносятся соответствующие коррективы [1].

Основные принципы решения задачи анализа РЦ основываются на детерминированном подходе

изучения размерных связей, что обуславливает использование метода «максимума-минимума». В условиях реального производства данный метод не отражает реального сочетания действительных погрешностей что приводит к излишнему ужесточению допусков на составляющие звенья [2, 3].

Признание случайного характера погрешностей, получаемых в результате производства, создало возможность применения стохастического подхода к анализу размерных связей. Переход к концепции стохастического изучения размерных связей позволил создать новый принцип расчета задач РЦ, получивший название «теоретико-вероятностного» метода [2].

Основная идея методологии решения задачи анализа, изложенная в работах [4, 5], заключается в определении экстремума нелинейной функции зависимости замыкающего звена РЦ от составляющих. Данный подход к расчету многомерных РЦ на «максимум-минимум» позволяет получить результат решаемой задачи с высокой точностью. Однако он требует осуществлять довольно громоздкие математические преобразования, что ограничивает его применение для решения реальных производственных задач [2].

В работе [6] основная идея подхода к решению задачи анализа РЦ заключается в нахождении предельных отклонений замыкающего звена на базе предельных значений составляющих звеньев. При решении задач многомерных РЦ, уравнения, связывающие предельные отклонения, имеют достаточно приближенный характер [2].

Также были предложены методики получения уравнений пространственных РЦ (ПРЦ) и реше-

ния по ним задачи анализа, используя метод «Монте-Карло». Особенность метода заключается в многократном повторении алгоритма, осуществляющего одно испытание. Достоинством этого метода является точность определения интервалов варьирования замыкающих величин. К недостаткам метода можно отнести достаточно большое количество реализаций, кроме того, моделирование случайных значений составляющих величин происходит по законам распределения, выбор которых достаточно условен [7].

В работах [8, 9] определена функция взаимосвязи звеньев ПРЦ на основе аналитического подхода, используя векторно-проективный и векторно-матричный способы. А в работе [10] в качестве метода линейной аппроксимации этой функции предлагается метод касательных как метод приближения в заданной точке, основанный на применении формулы Тейлора. Предложенный метод ограничивается в использовании, по причине сложных математических условий непрерывности и сходимости используемых функций.

Функцию взаимосвязи звеньев ПРЦ также можно определить, используя экспериментальный подход, основанный на применении аппарата регрессионного анализа [11], однако на основе этого подхода можно сделать заключение только о конечных результатах влияния изменения геометрических параметров составляющих звеньев на величины замыкающего звена. Кроме этого, при регрессионном анализе нет возможности оценить ошибку замены реальной взаимосвязи размеров СЧ конструкции регрессионной зависимостью [12].

В современных САПР, позволяющих выполнять расчет точности, как правило, реализованы методы «максимума-минимума» и Монте-Карло [13, 14]. «Теоретико-вероятностный» метод применяется существенно реже, в силу сложности алгоритмиза-

ции. Так как метод «максимума-минимума» не позволяет определять оптимальные значения отклонений геометрических параметров объектов производства при решении задач анализа, то основным методом расчета точности в САПР является стохастическое моделирование [13].

Получение оценки модели ПРЦ также возможно с помощью эксперимента [15-17], однако отсутствует как методика оценки элементов такой модели (в количественном отношении), так и методика оценки адекватности синтезированной модели ПРЦ в целом (в качественном отношении).

Решение вышеуказанной задачи усложняется в случае наличия полимерно-композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях объекта сборки. В этом случае должна быть учтена специфика влияния конструктивно-технологических параметров СЧ из ПКМ как на этапах синтеза РЦ, так и на этапах их последующего анализа и оценки.

Синтез модели ПРЦ для композитных конструкций

Дальнейшая разработка методики синтеза ПРЦ и ее анализа и оценки будет выполняться для типовой конструкции кессона (КК) агрегата летательного аппарата (ЛА), который включает в себя СЧ как из ПКМ, так и из металлических материалов (ММ) (рис. 1).

Построение ПРЦ сборной конструкции связано с представлением геометрии ее модели в виде систем координат (СК) СЧ. При этом, чем больше количество СЧ и чем сложнее их структура и геометрия, тем сложнее будет структура ПРЦ в целом.

Для решения этой проблемы рассмотрим подход декомпозиции общей структуры ПРЦ. На низшем уровне необходимо анализировать детали конструкции и соответственно учитывать технологические особенности на этапе их изготовления. Для

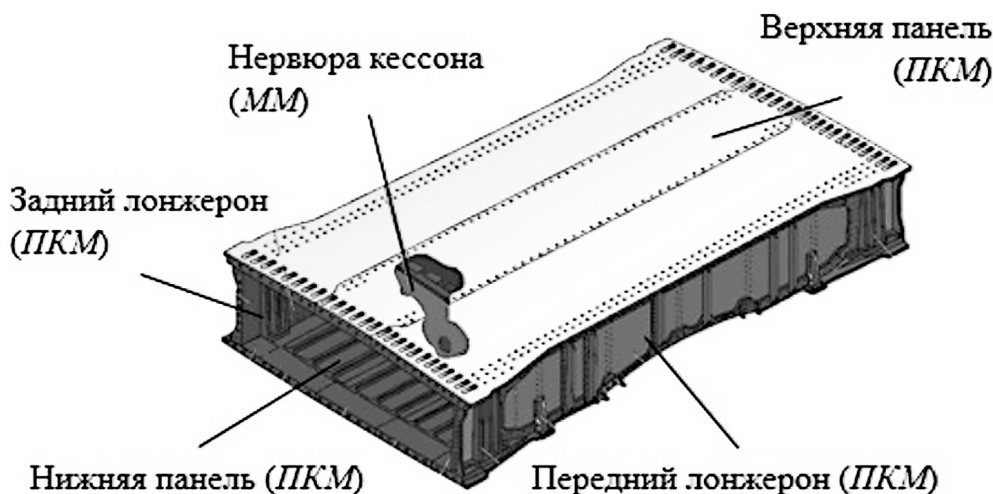


Рис. 1. Типовая конструкция кессона агрегата ЛА

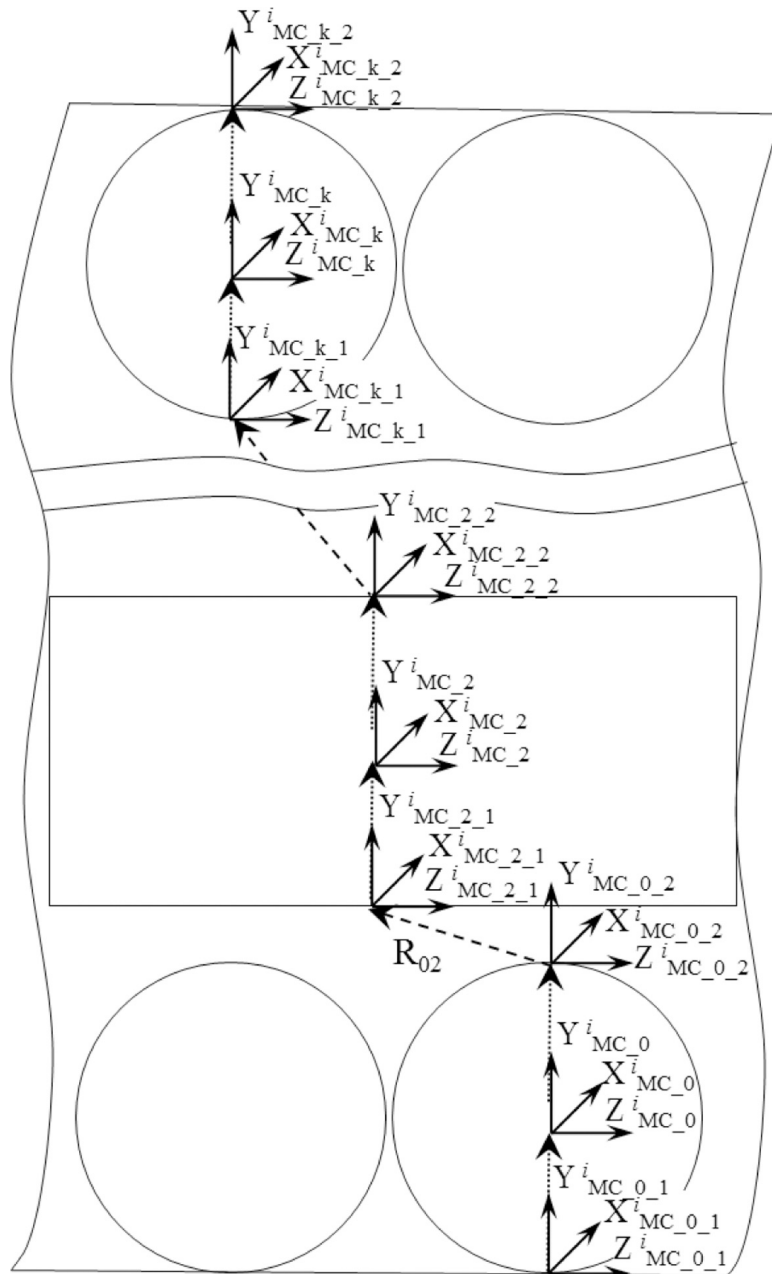


Рис. 2. Типовая модель структуры РЦСЧ из ПКМ:

$XYZ_{MC_0}^i$ – базовая СК СЧ; $R_{01} = f(a, b, \dots, m)$ – составляющее звено РЦ, как функция от m конструктивно-технологических параметров СЧ; k – количество слоев материала

конструкции, рассмотренной выше, наиболее сложной структурой обладают СЧ из ПКМ (панели и лонжероны). Типовая модель структуры РЦ СЧ из ПКМ показана на рис. 2.

После синтеза ПРЦ для СЧ из ПКМ в дальнейшем целесообразно представлять ее в сокращенном виде (рис. 3).

На высшем уровне декомпозиции структуры необходимо анализировать непосредственно сборную конструкцию. Упростить такой анализ можно используя схему конструктивно-технологического членения конструкции. Так, для КК из ПКМ можно

выделить этап «А» – подборка элементов каркаса и нижних панелей в сборочном приспособлении (СП) (рис. 3), после чего выполняется установка верхней панели и окончательная сборка КК в СП (рис. 4).

Предложенная модель ПРЦ (рис. 4) также является универсальной, что обеспечивается возможностью корректировки на разных уровнях ее декомпозиции, без деструктуризации модели в целом. Целесообразно использовать такую модель в соответствующих автоматизированных системах, не только для формирования и синтеза ПРЦ, а и для дальнейшего ее анализа и оценки.

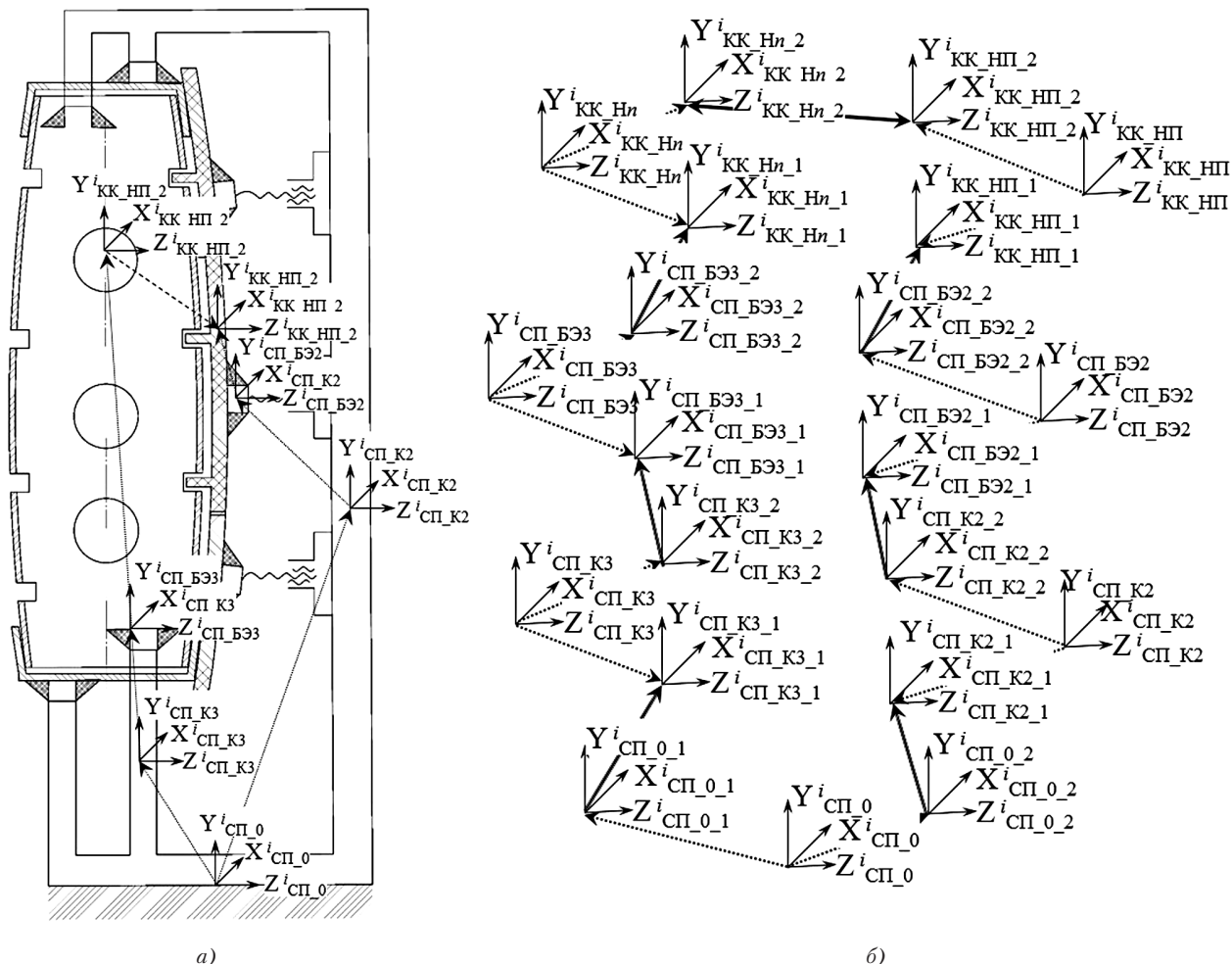


Рис. 3. Модель структуры РЦ под сборки «А» КК из ПКМ в СП:
а) укрупненная; б) детализированная

Оценки адекватности модели ПРЦ для конструкций из ПКМ

Для синтезированной модели ПРЦ КК из ПКМ в СП рациональным будет рассмотрение возможности использования следующих методов оценки ее адекватности:

- на основе поля допуска для отклонений на матрице плана;
- на основе радиуса эквивалентности;
- на основе стохастического моделирования (метод Монте-Карло).

Первый метод состоит в том, что значения замыкающей величины моделируются на строках матрицы плана и определяются как по известной модели ПРЦ, так и по линейной модели ПРЦ и условие адекватности означает, что отклонения этих значений по всем строкам находятся в поле допуска, рассчитанном по линейной модели. Такой метод является достаточно простым для оценки одной точки модели. Что касается оценки части модели ПРЦ для СЧ из ПКМ, матрица плана будет иметь большое количество строк, что значительным обра-

зом усложнит процедуры оценки модели ПРЦ в целом.

Второй метод основан на замене совокупности одномерных полей допусков моделью постоянного радиуса и условие адекватности означает, что вектор отклонений замыкающей величины не выходит за пределы этой модели. Данный метод оценки ПРЦ является более точным, за счет возможности учета неоднородного характера отклонений для различных материалов конструкции, но в виду более сложной структуры модели оценки значительно увеличит трудоемкость расчетов для сложных сборных конструкций.

Третий метод использует метод Монте-Карло, при котором по заданным законам многократно моделируются реализации составляющих величин, а по модели ПРЦ определяются значения замыкающей величины. Условие адекватности означает, что частота попадания этих значений в поле допуска, полученное по линейной модели, должна удовлетворять заданному требованию. Из вышерассмотренных трех методов оценки адекватности модели ПРЦ метод на основе стохастического моделирова-

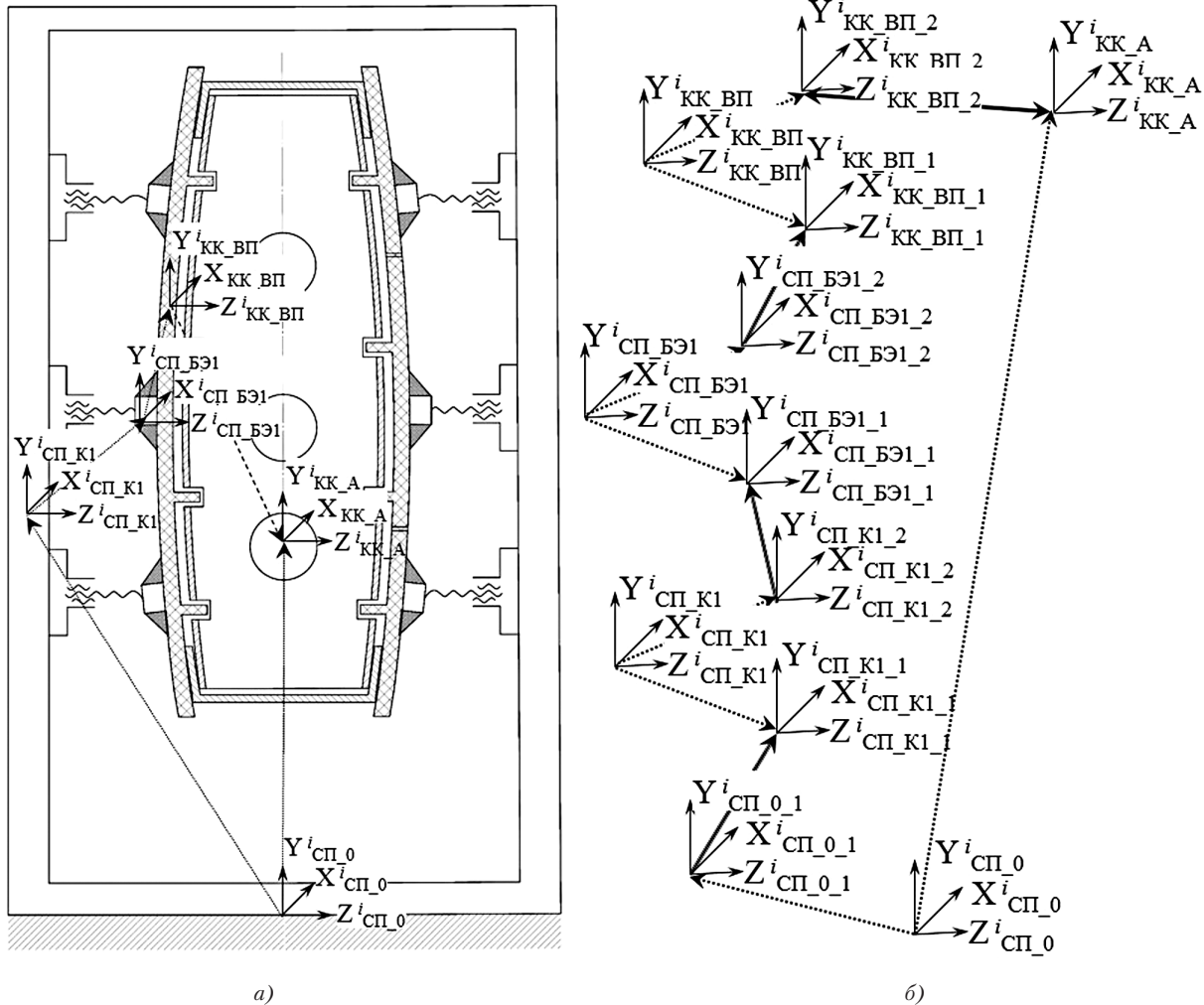


Рис. 4. Модель структуры РЦ КК из ПКМ в СП:
а) укрупненная; б) детализированная

ния будет являться предпочтительным, т.к. наряду с относительной простотой процедур решения задачи оценки, полученные результаты смогут отображать, максимально приближенный к производству, характер адекватности синтезированной ранее модели ПРЦ конструкции из ПКМ.

Для реализации процедур оценки модели ПРЦ КК из КПКМ используя метод Монте-Карло необходимо решить задачу преобразования синтезированной модели в векторно-матричный вид. Для этого целесообразно также применить подход декомпозиции, рассмотренный ранее. Так на низшем уровне обозначим систему уравнений модели ПРЦ для СЧ из ПКМ:

$$Y_{СЧизПКМ} = f(X_0, R_{01}, X_1, \dots, R_{(k-1)k}, X_k) \quad (1)$$

$$R_{(k-1)k} = f(a, b, \dots, m),$$

где $Y_{СЧизПКМ}$ – замыкающее звено СЧ из ПКМ, которое характеризуют отклонения СЧ в целом, как функция от составляющих: X_0, X_1, \dots, X_k – характеризуют отклонения наполнителя (волокон мате-

риала), $R_{01}, \dots, R_{(k-1)k}$ – характеризуют отклонения связующего материала, как функция от m конструктивно-технологических параметров.

Для дальнейшего анализа будут учитываться следующие параметры для связующего материала СЧ из ПКМ:

- конструктивные: μ – вязкость, β – расширение,
- технологические: t – темпера, P – давление.

Так система (1) будет иметь следующий вид:

$$Y_{СЧизПКМ} = f(X_0, R_{01}, X_1, \dots, R_{(k-1)k}, X_k) \quad (2)$$

$$R_{(k-1)k} = f(\mu, \beta, t, P),$$

Для оценки модели ПРЦ СЧ из КПКМ используя метод Монте-Карло сформируем поле допуска замыкающей величины на основе уравнения модели ПРЦ:

$$Y(\Delta X_k^T, R_{(k-1)k}^T) = R_{(k-1)k} + \Sigma \Delta X_k, \quad i = 0, k \quad (3)$$

где Δ – отклонение, T – допуск.



При этом, номинальное значение поля допуска будет равно

$$Y(\Delta X_k^T, R_{(k-1)k}^T) = R_{(k-1)k}, \quad (4)$$

а допуск определяется одним из уравнений:

$TY = \Sigma |R_{(k-1)k}| TX_i$ — для обеспечения требований полной взаимозаменяемости;

$TY = \sqrt{\Sigma R_{(k-1)k}^2 TX_i^2}$ — для обеспечения требований частичной взаимозаменяемости.

Так поле допуска будет иметь следующий вид

$$[Y_{\min}, Y_{\max}] = R_{(k-1)k} \pm \frac{1}{2} TY. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Y_{\text{СЧизПКМ}}(X_0, R_{01}, X_1, \dots, R_{(k-1)k}, X_k) = \\ = Y_{\text{СЧизПКМ}}(X_0 + \Delta X_0, R_{01} + \Delta R_{01}, X_1, + \\ + \Delta X_1, \dots, R_{(k-1)k} + \Delta R_{(k-1)k}, X_k + \Delta X_k) \\ R_{(k-1)k} = f(\mu, \beta, t, P), \end{aligned} \quad (6)$$

Обратимся к системе уравнений модели ПРЦ СЧ из ПКМ:<

где $X_i, R_{(i-1)i}$ — номинальные значения составляющих величин; $\Delta X_i, \Delta R_{(i-1)i}$ — отклонения составляющих величин от номинальных значений.

Положим эти отклонения случайными величинами $\Delta X_i, \Delta R_{(i-1)i}, i = 0, k$. Значения параметров законов распределения этих случайных величин выберем такими, чтобы выполнялось условие

$$\begin{aligned} P(\Delta X_i, \Delta R_{(i-1)i} \in \\ \in [\Delta X_{i\min}, \Delta R_{(i-1)i\min}, \Delta X_{i\max}, \Delta R_{(i-1)i\max}]) = \\ = 1 - \varepsilon, \varepsilon \ll 1, \end{aligned} \quad (7)$$

где $[\Delta X_{i\min}, \Delta R_{(i-1)i\min}, \Delta X_{i\max}, \Delta R_{(i-1)i\max}]$ — поле допуска составляющей величины $X_i, R_{(i-1)i}$.

Система уравнений модели ПРЦ СЧ из ПКМ в этом случае будет иметь вид

$$\begin{aligned} Y_{\text{СЧизПКМ}}(X_0 + \Delta X_0, R_{01} + \Delta R_{01}, X_1, + \\ + \Delta X_1, \dots, R_{(k-1)k} + \Delta R_{(k-1)k}, X_k + \Delta X_k) = \\ = Y_{\text{СЧизПКМ}}(X_0, R_{01}, X_1, \dots, R_{(k-1)k}, X_k) = Y \\ R_{(k-1)k} = f(\mu, \beta, t, P), \end{aligned} \quad (8)$$

где $X_i = X_i + \Delta X_i, R_{(i-1)i} = R_{(i-1)i} + \Delta R_{(i-1)i}$ — случайные аргументы уравнения модели ПРЦ.

Уравнение (8) при случайных аргументах обуславливает замыкающую величину как случайную величину Y . Теперь условие адекватности модели можно определить следующим отношением

$$P\left(Y \in R_{(k-1)k} \pm \frac{1}{2} TY\right) \geq 1 - \varepsilon Y, \varepsilon Y \ll 1. \quad (9)$$

Проверка условия адекватности (9) реализуется на основе стохастического моделирования, с учетом суммарного коэффициента учета дополнительных отклонений для СЧ из ПКМ.

После решения задачи оценки модели ПРЦ СЧ из ПКМ (на низшем уровне декомпозиции) решается комплексная задача оценки модели ПРЦ конструкции в целом, согласно вышеописанной методике. Для современных сборных конструкций из ПКМ необходима автоматизация алгоритма большого объема расчетных случаев.

Выводы

При рассмотрении вопросов формирования и синтеза, а также анализа и оценки и оценки ПРЦ для сборных конструкций из ПКМ, основной задачей является учет специфических конструктивно-технологических параметров, определяемых анизотропией и неоднородностью свойств ПКМ. Для решения данной задачи предложена методика, подразумевающая представление модели в виде систем и подсистем связанных СК сборной конструкции, связи в которой описывают специфические конструктивно-технологические параметры СЧ из ПКМ. При этом, учитываются особенности технологий изготовления СЧ из ПКМ и сборки конструкции в целом.

Вопросы анализа и оценки вышеуказанной модели были описаны используя метод на основе стохастического моделирования, что показало ее адекватность и целесообразность использования предложенной методики для сборных конструкций из ПКМ. Предложенную методику целесообразно применять на этапах проектирования конструкции с использованием САПР, для обеспечения возможности дальнейшего применения автоматизированного оборудования для изготовления СЧ из ПКМ и сборки конструкции в целом.

Литература

- [1] Булатов В.П., Фридендер И.Г. Расчет точности машин и приборов. — СПб.: Политехника, 1993. — 495 с.
- [2] Карепин П.А. Обеспечение качества сельскохозяйственной техники при изготовлении и ремонте моделированием размерных связей в сборочных узлах: Дис. докт. техн. наук. — М., 2002. — 491 с.
- [3] Брук СИ., Лившиц Б.И., Гостев В.Н. Технологические размерные расчеты. — М.: НИИ МВ, 1948. — 183 с.
- [4] Основы теории точности машин и приборов / В.П. Булатов, В.А. Брагинский, Ф.И. Демин и др. — СПб.: Наука, 1993. — 232 с.
- [5] Демин Ф.И. Исследование размерных связей соединений и передач при конструировании и изготовле-

- нии изделий // Известия вузов. Авиационная техника. — 1982. — № 1. — С. 77-82.
- [6] Тимирязев В.А. Управление размерными связями системы СПИД. — М.: НИИМАШ, 1977. — 84 с.
- [7] Карепин П.А. Теоретические законы распределения и их обоснование в задачах анализа точности многомерных размерных цепей. — М.: МГАУ, 1999. — 256 с.
- [8] Карепин П.А. Основы расчета размерных цепей. В 3-х частях. — М.: МГАУ им. Горячкина, 1994. — Ч. 2. — 44 с.
- [9] Карепин П.А. Основы расчета размерных цепей. В 3-х частях. — М.: МГАУ им. Горячкина, 1994. — Ч. 3. — 50 с.
- [10] Карепин П.А. Математические основы теории размерных цепей при технологическом и метрологическом обеспечении качества изделий. — М.: Инфор-агротех, 1999. — 325 с.
- [11] Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под ред. А.Н. Гаврилова. — М.: Машиностроение, 1973. — 527 с.
- [12] Пампуро В.И. Структурная информационная теория надежности систем. — Киев: Наукова думка, 1992. — 328 с.
- [13] Фундаментальные проблемы теории точности / Под ред. В.П. Булатова, И.Г. Фридлиндера. — СПб.: Наука, 2001. — 504 с.
- [14] Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 360 с.
- [15] Назаров Н.Г. Планирование и обработка результатов. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. — 304 с.
- [16] Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели: Учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 2002. — 348 с.
- [17] Назаров Н.Г. Планирование измерений при экспериментальной оценке их единства // Измерительная техника. — 2000. — № 2.

Pasechnyk V. A., Khmurenko A. A.

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute», Ukraine, Kiev

METHOD OF DIMENSION CHAINS ANALYSIS AND EVALUATION FOR PCM ASSEMBLY CONSTRUCTIONS

Proposed method of dimension chains analysis and evaluation, based on pre-formed and synthetic dimensional chain stochastic modeling, which takes into account specific design and technological parameters. Structural model is presented in form of systems and subsystems related coordinate systems, connections in which allow to describe particular technology PCM components manufacturing, and further assembly constructions as a whole.

Keywords: dimension chain estimates; stochastic modeling; PCM assembly constructions.

References

- [1] Bulatov V.P., Fridlender I.G. Raschet tochnosti mashin i priborov. — SPb.: Politehnika, 1993. — 495 p.
- [2] Karepin P.A. Obespechenie kachestva sel'skohozyajstvennoj tehniki pri izgotovlenii i remonte modelirovaniem razmernih svyazej v sborochnyh uzlah; Dis. dokt. tehn. nauk. — M., 2002. — 491 p.
- [3] Bruk S.I., Livshic B.I., Gostev V.N. Tehnologicheskie razmerye raschety. — M.: NII MB, 1948. — 183 p.
- [4] Osnovy teorii tochnosti mashin i priborov / V.P. Bulatov, V.A. Braginskij, F.I. Demin i dr. — SPb.: Nauka, 1993. — 232 p.
- [5] Demin F.I. Issledovanie razmernih svyazej soedinenij i peredach pri konstruirovanii i izgotovlenii izdelij // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. — 1982. — № 1. — P. 77-82.
- [6] Timirjazev V.A. Upravlenie razmernymi svyazjami sistemy SPID. — M.: NIIMASH, 1977. — 84 p.
- [7] Karepin P.A. Teoreticheskie zakony raspredelenija i ih obosnovanie v zadachah analiza tochnosti mnogomernih razmernih cepej. — M.: MGAU, 1999. — 256 p.
- [8] Karepin P.A. Osnovy rascheta razmernih cepej. V 3-h chastjah. — M.: MGAU im. Gorjachkina, 1994. — Ch. 2. — 44 p.
- [9] Karepin P.A. Osnovy rascheta razmernih cepej. V 3-h chastjah. — M.: MGAU im. Gorjachkina, 1994. — Ch. 3. — 50 p.
- [10] Karepin P.A. Matematicheskie osnovy teorii razmernih cepej pri tehnologicheskom i metrologicheskom obespechenii kachestva izdelij. — M.: Inforagroteh, 1999. — 325 p.
- [11] Tochnost' proizvodstva v mashinostroenii i priborostroenii / Pod red. A.N. Gavrilova. — M.: Mashinostroenie, 1973. — 527 p.



- [12] Pampuro V.I. Strukturnaja informacionnaja teorija nadezhnosti sistem. — Kiev: Naukova dumka, 1992. — 328 p.
- [13] Fundamental'nye problemy teorii tochnosti / Pod red. V.P. Bulatova, I.G. Fridlendera. — SPb.: Nauka, 2001. — 504 p.
- [14] Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovanija. — M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2000. — 360 p.
- [15] Nazarov N.G. Planirovanie i obrabotka rezul'tatov. — M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2000. — 304 p.
- [16] Nazarov N.G. Metrologija. Osnovnye ponjatija i matematicheskie modeli: Ucheb. posobie. — M.: Vysshaja shkola, 2002. — 348 p.
- [17] Nazarov N.G. Planirovanie izmerenij pri jeksperimental'noj ocenke ih edinstva // Izmeritel'naja tehnika. — 2000. — № 2.