

## ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### DESIGN CALCULATION OF DIMENSIONAL CHAINS ON THE BASIS OF SIMULATION MODELING

УДК 621.7+004.94

**В.В. Фролов\***

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2019-13709>

**V. Frolov\***

V.N. Karazin Kharkiv National University

#### РЕФЕРАТ

*РАЗМЕРНАЯ ЦЕПЬ, ЗАМЫКАЮЩЕЕ ЗВЕНО, МЕТОД НЕПОЛНОЙ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ, ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ, ХРОМОСОМА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ*

*Предметом исследования данной статьи является процесс проектного расчета линейных размерных цепей. Целью данной статьи является разработка метода выбора наиболее рационального сочетания допусков и отклонений на основе моделирования случайных сочетаний этих параметров с помощью генетического алгоритма и отборе наилучших особей с учетом различных технических ограничений. Имитационное моделирование расчетов с выбором наилучшего варианта по критерию, используемому в статье, обеспечивает решение проектной задачи расчета размерных цепей с высокой вероятностью при достаточно широком диапазоне сочетания размеров и технических требований к ним. Данный критерий оценивает погрешность отклонения расчетного значения замыкающего звена от заданного значения. Это дает возможность проектировщику, даже при самом худшем сочетании параметров размеров, решить задачу с максимальной погрешностью и оценить направления изменения конструкции с целью её уменьшения.*

#### ABSTRACT

*DIMENSIONAL CHAIN, CLOSING LINK, METHOD OF INCOMPLETE INTERCHANGEABILITY, GENETICAL-ALGORITHM, CHROMOSOME, MATHEMATICAL MODEL, INFORMATION MODEL, SIMULATION MODEL*

*The object of the research is the process of design calculation of linear dimensional chains. The purpose of this article is development of a method to choose the most rational combination of admissions and deviations on the basis of modeling of accidental combinations of these parameters by means of a genetic algorithm and selection. Imitating modeling of calculations with the choice of the best option by the criterion used in the article provides the solution of a design problem of calculation of dimensional chains with high probability at rather broad range of a combination of the sizes and technical requirements to them. This criterion evaluates an error of a deviation of a design value of the closing link from a preset value. It gives the chance to the designer, even at the worst combination of parameters of the sizes, to solve a problem with the maximum error and to evaluate the directions of change of a design for the purpose of its reduction.*

#### АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность элементов конструкции оборудования, с одной стороны, влияет на его функциональные характеристики, а с другой, – на его сто-

имость, поскольку непосредственно отражается на технологии изготовления этих элементов. Задача конструктора состоит в выборе конструктивного решения, которое уравнивает эти вза-

\* E-mail: [vvicfrol@rambler.ru](mailto:vvicfrol@rambler.ru) (V. Frolov)

исключающие проблемы. Расчет размерных цепей является одним из основных направлений при решении данной задачи, поскольку позволяет численно определить компромиссное решение с точки зрения стоимости и функциональности при определенных условиях. Поэтому методы, автоматизирующие решение данной задачи, являются актуальными на сегодняшний день для практики конструирования.

В современных САПР [1–7], позволяющих разрабатывать параметрические модели деталей и сборок, широко используется подход, который основан на моделировании методом Монте-Карло сочетания размеров в размерных цепях с заданными законами распределения. Существуют подходы, которые учитывают функциональные требования к сборке [7], а также учитывают технологическую себестоимость каждого конструкторского решения при выборе параметров точности конструктивных элементов [8].

Анализ показывает, что методы, используемые в САПР при всех своих достоинствах при решении задач конкретной практической направленности, обладают следующими недостатками: необходимость наличия большой базы данных по технологической себестоимости для оценки новых конструктивных решений для метода [8] и отсутствие аналитических моделей, позволяющих на стадии проектных работ оценить себестоимость проектируемой конструкции; зависимость метода Монте-Карло от величины выборки, чем больше выборка, тем точнее получается расчет для метода [1]; сложность адаптации расчета в SETOL 6σ к общепринятым в нашей инженерной практике подходам; использование метода равных допусков и метода равной точности в [2], что упрощает расчет за счет снижения размерности задачи, но при этом сужает область поиска возможных решений; неоднозначность выбора решения при использовании инструментов прямого моделирования, реализованных в NX [3].

В связи с вышеуказанным, целью данной работы является совершенствование метода имитационного моделирования расчета размерных цепей на основе направленного моделирования случайных сочетаний допусков и отклонений с помощью генетического алгоритма (ГА) и отбо-

ре наилучших решений по функции приспособленности, с учетом технических ограничений на область поиска, которые накладываются проектировщиком.

Расчет в этом случае предполагает получение выборки из генеральной совокупности сочетаний допусков и отклонений звеньев размерной цепи, на основе которой принимается проектное решение. При генерации выборки останов ГА производится только после выполнения всех заданных тактов, а не по стабилизации функции приспособленности. Использование ГА необходимо для направленной генерации выборки на основе элитарного отбора особей, отражающих состояния имитационной модели, с оценкой качества моделирования расчета, и обусловлено доказанной эффективностью ГА при поиске решения для NP сложных задач дискретной оптимизации. В частности, авторы работы [9] пишут: «В отличие от других методов оптимизации ГА, как правило, анализируют различные области пространства решений одновременно и более приспособлены к нахождению новых областей с лучшими значениями ЦФ (целевой функции – расшифровка моя)».

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: определить критерий оценки качества моделирования расчета размерных цепей, обеспечивающий расчет как обычных, так и связанных размерных цепей; разработать обобщённую математическую модель расчета размерных цепей для имитационного моделирования, учитывающую возможность наложения ограничений на изменения допусков и отклонений непосредственно проектировщиком из учета функциональных и производственных требований к модели; разработать модель предметной области расчета размерных цепей, необходимую для программной реализации предлагаемого метода; определить параметры ГА, необходимые для решения практических задач расчета размерных цепей. Рассмотрим последовательно решение этих задач.

Математическая модель для расчета размерных цепей имитационным моделированием основывается на следующих теоретических положениях классического расчета:

1. Допуск замыкающего звена для метода полной взаимозаменяемости вычисляется

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n T_i, \quad [10, \text{ф. 3.9, с. 25}] \quad (1)$$

где  $T_{\Sigma}$  – допуск замыкающего звена;  $T_i$  – допуск звена, составляющего размерную цепь;  $n$  – количество составляющих звеньев размерной цепи.

2. Допуск замыкающего звена для метода неполной взаимозаменяемости вычисляется

$$T_{\Sigma} = t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 T_i^2}, \quad [10, \text{ф. 3.48, с. 39}] \quad (2)$$

где  $t$  – коэффициент, зависящий от процента риска;  $\lambda_i^2$  – коэффициент относительного рассеяния, который зависит от закона распределения.

3. Середина поля допуска замыкающего звена вычисляется для всех методов

$$\Delta_{c\Sigma} = \sum_{i=1}^n \xi_i \Delta_{c_i}, \quad [10, \text{ф. 3.15, с. 26}] \quad (3)$$

где  $\Delta_{c\Sigma}$  – середина поля допуска замыкающего звена;  $\xi_i$  – коэффициент, определяющий тип составляющего звена (1 – увеличивающее / -1 – уменьшающее);  $\Delta_{c_i}$  – середина поля допуска составляющего звена.

4. Верхнее и нижнее отклонение замыкающего звена для всех методов вычисляется

$$\begin{cases} \Delta S_{\Sigma} = \Delta_{c\Sigma} + \frac{T_{\Sigma}}{2} \\ \Delta I_{\Sigma} = \Delta_{c\Sigma} - \frac{T_{\Sigma}}{2} \end{cases}, \quad [10, \text{ф. 3.16–3.17, с. 26}] \quad (4)$$

где  $\Delta S_{\Sigma}$  – верхнее отклонение замыкающего звена;  $\Delta I_{\Sigma}$  – нижнее отклонение замыкающего звена.

$$\Delta_c = \frac{\Delta S + \Delta I}{2}. \quad [10, \text{ф. 3.10, с. 25}] \quad (5)$$

Для критерия качества моделирования в данной работе используется оценка погрешности моделирования размерной цепи по суммарной

абсолютной погрешности расчетных значений отклонений замыкающего звена от фактических значений по чертежу и суммарной погрешности по всем цепям в случае взаимосвязанных цепей (рисунок 1):

$$\begin{aligned} ERR_j &= |[\Delta S_{\Sigma_j}] - \Delta S_{\Sigma_j}| + |[\Delta I_{\Sigma_j}] - \Delta I_{\Sigma_j}|; \\ ERR_{\Sigma} &= \sum_{j=1}^m ERR_j; \quad ERR_{\Sigma} \rightarrow \min, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $ERR_j$  – суммарная погрешность по верхним и нижним отклонениям для одной цепи;  $ERR_{\Sigma}$  – суммарная погрешность по всем взаимосвязанным цепям;  $m$  – количество взаимосвязанных цепей;  $[\Delta S_{\Sigma_j}]$  – верхнее отклонение замыкающего звена по чертежу;  $\Delta S_{\Sigma_j}$  – верхнее отклонение замыкающего звена, полученное моделированием (для нижнего отклонения обозначения аналогичны).

Из схемы на рисунке 1 видно, что при любом расположении относительно нулевой линии и соотношении величин допусков размеров, предложенный критерий дает возможность оценить суммарную погрешность.

При подборе параметров звеньев размерной цепи варьируются номера квалитетов и буквы отклонений, причем задавая ограничения на эти параметры, можно получать различные способы расчета размерных цепей. Например, способ равной точности (одного квалитета) предполагает равенство квалитетов для всех звеньев, следовательно, на множество квалитетов накладывается ограничение на равенство квалитетов этих звеньев и так далее. Учитывая эти особенности подбора, необходимо в целевую функцию (6) подставить расчетные значения верхнего и нижнего отклонений с учетом (4). Для этого в (4) подставляем (3)

$$\begin{cases} \Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \xi_i \Delta_{c_i} + \frac{T_{\Sigma}}{2} \\ \Delta I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \xi_i \Delta_{c_i} - \frac{T_{\Sigma}}{2} \end{cases}. \quad (7)$$

В (7) подставляем расчет середины поля допуска из (5)

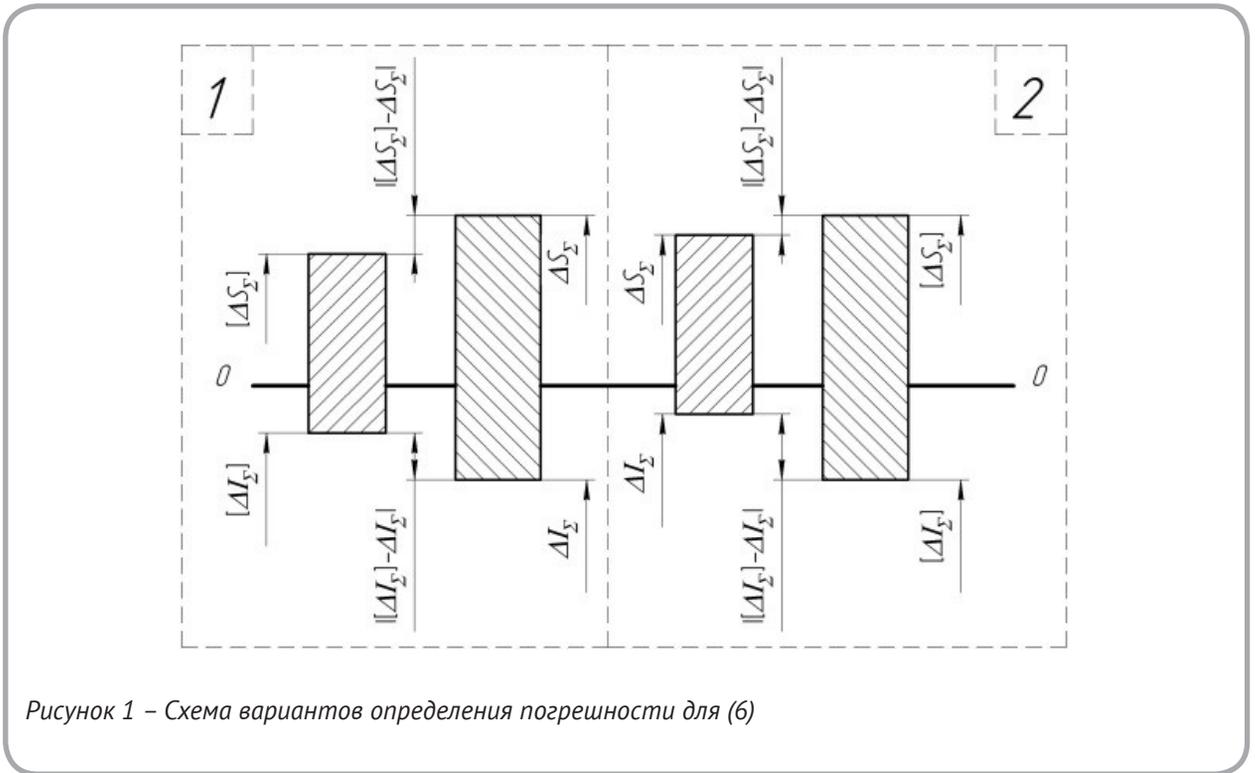


Рисунок 1 – Схема вариантов определения погрешности для (6)

$$\begin{cases} \Delta S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left( \xi_i \cdot \left[ \frac{\Delta S_i + \Delta I_i}{2} \right] \right) + \frac{T_{\Sigma}}{2} \\ \Delta I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left( \xi_i \cdot \left[ \frac{\Delta S_i + \Delta I_i}{2} \right] \right) - \frac{T_{\Sigma}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

В (8) допуск замыкающего звена  $T_{\Sigma}$  рассчитывается по формулам (1) и (2) в зависимости от метода расчета (**type** = 1 для метода полной взаимозаменяемости; **type** = 2 для неполной) и с учетом того, что допуск нужно рассчитывать по верхнему и нижнему отклонению

$$T_{\Sigma} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (\Delta S_i - \Delta I_i) \text{ if } \text{type} = 1 \\ t \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 (\Delta S_i - \Delta I_i)^2} \text{ if } \text{type} = 2 \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, подставив в (6) и (7) выражения (8) и учитывая (9), получаем целевую функцию (10) для оценки качества моделирования размерных цепей

$$\begin{aligned} ERR_{\Sigma} = & \sum_{j=1}^m \left| \Delta S_{\Sigma j} - \sum_{i=1}^{n_j} \left( \xi_{i,j} \cdot \left[ \frac{\Delta S_{i,j} + \Delta I_{i,j}}{2} \right] \right) + \frac{T_{\Sigma j}}{2} \right| + \\ & + \frac{T_{\Sigma j}}{2} \left| + \left[ \Delta I_{\Sigma j} \right] - \sum_{i=1}^{n_j} \left( \xi_i \cdot \left[ \frac{\Delta S_{i,j} + \Delta I_{i,j}}{2} \right] \right) - \frac{T_{\Sigma j}}{2} \right|. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда математическая модель выбора оптимальных параметров размерной цепи представляется в виде

$$\begin{aligned} ERR_{\Sigma}^* = & \min_{DM \in V} \{ERR_{\Sigma}(DM)\}, \\ V = & \{DM : DM = \{dm : dm = (i, \delta), i \in IT_i^j, \delta \in A_j^j, j \in J, J = \overline{1, m}, i \in I_j, I_j = \overline{1, n_j}\}\} \\ IT_i^j = & \left\{ i : (i \in BIT) \wedge \left( \bigwedge_{k=1}^{n_i} PIT(i)_k = 1 \right) \right\}, BIT = \{6, 7, 8, \dots, 16\}, |BIT| = 11, \\ A_j^j = & \left\{ \delta : (\delta \in BA) \wedge \left( \bigwedge_{k=1}^{n_j} PA(\delta)_k = 1 \right) \right\}, |BA| = 24, \\ BA = & \{a, b, c, d, e, f, g, h, js, m, n, p, r, s, u, x, A, B, C, D, E, F, G, H\}, \end{aligned} \quad (11)$$

где **DM** – множество подбираемых параметров для одной реализации модели размерной цепи; **V** – множество всех возможных реализаций модели размерной цепи; **BIT** – исходное множество номеров квалитетов; **BA** – исходное множество букв отклонений;  $IT_i^j$  – множество

номеров качитетов с учетом ограничений для  $i$ -го звена  $j$ -й размерной цепи;  $\Delta_i^j$  – множество букв отклонений аналогично  $IT_i^j$ ;  $p_i^j$  – количество ограничений аналогично  $IT_i^j$ ;  $it$  – номер качитета;  $\delta$  – буква отклонения;  $PIT(it)_k$  – предикат ограничения для качитетов;  $n_j$  – количество составляющих звеньев  $j$ -й размерной цепи;  $PA(it)_k$  – предикат ограничения для букв отклонений.

Решаем задачу (11) дискретной оптимизации с помощью генетического алгоритма, где **DM** преобразуется в хромосому, здесь геном будет элемент из пары  $(it, \delta)$ . Тогда длина хромосомы в генах **Lh** будет вычисляться по формуле (12)

$$Lh = 2 \cdot \left( \left( \sum_{j=1}^m n_j \right) - dp \right), \quad (12)$$

где **dp** – количество связанных звеньев по размерным цепям. В результате хромосома будет из пар  $(it, \delta)$  для каждого размера по каждой цепи за вычетом повторяющихся, то есть связанных.

Информационная модель размерной цепи с учетом математической модели (11) изображена на рисунке 2.

Информационная модель – это XML документ **chains**, который содержит множество составляющих звеньев размерных цепей **chain** с необходимыми для расчетов параметрами и имеет дату и время создания. Эта модель является исходной для разработки модели предметной области.

При моделировании размерной цепи (рисунок 3) исходим из следующих соображений:

1. Все действия по расчету размерной цепи

выполняются над совокупностью составляющих звеньев одной или нескольких размерных цепей, объединенных в документ, который в классическом расчете представляется таблицей. В терминах объектно-ориентированного проектирования расчет представляется как экземпляр класса **DocumentClass** (рисунок 3). Данный класс содержит основные операции по расчету размерных цепей и модель **Chains** размерной цепи в виде списка объектов типа **Dimension**.

2. Основные операции при расчете размерных цепей можно разделить на три группы: манипуляции с документом; расчет; выбор оптимальных параметров.

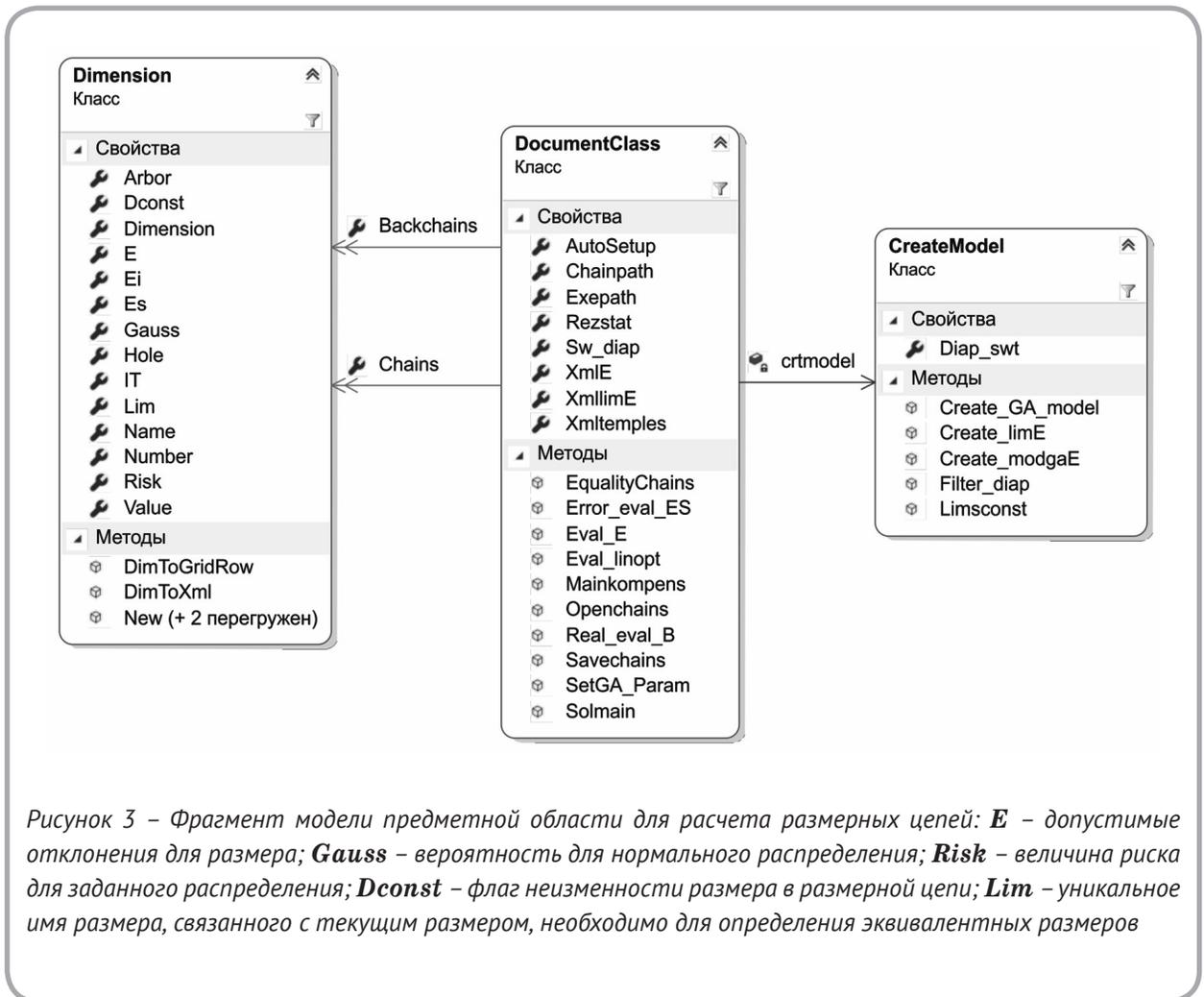
К первой группе относятся операции: **Openchains** – загрузка в память информационной модели размерных цепей, где информационная модель на рисунке 2 преобразуется в модель на рисунке 3; **Savechains** – сохранение информационной модели в файле разметки, здесь все происходит в обратном порядке.

Ко второй группе относятся операции: **Solmain** – расчет значений замыкающих звеньев (обратная задача) всех имеющихся цепей; **Solcha** – расчет значений замыкающего звена (обратная задача) выделенной цепи; **Mainkompens** – расчет значений компенсатора для выбранной цепи; **Error\_eval\_ES** – расчет погрешности подбора отклонений на основе целевой функции (10); **Real\_eval\_B** – расчет реального процента брака.

К третьей группе относятся операции по подготовке модели к расчету и непосредственно выбор оптимальных параметров: **EqualityChains** – установка эквивалентных размеров; **Eval\_linopt** – решение проектной (прямой) задачи

```
<chains data="10-20-2018" time="11:28:54" diap="false">
  <chain number="1" dimension="0" name="D=:149185080" value="25"
    es="1.65" ei="-1.65" hole="" arbor="js18" IT="5 16" e="a h"
    gauss="0" risk="3" const="0" lim="" />
  <!-- ... -->
</chains>
```

Рисунок 2 – Информационная модель размерной цепи (фрагмент)



расчета размерных цепей моделированием; **SetGA\_Param** – автоматическое определение параметров ГА.

3. Тип **Dimension** содержит все параметры (рисунок 2), необходимые для формирования модели (11): **Number** – номер размерной цепи; **Dimension** – тип звена (уменьшающее, увеличивающее, замыкающее); **Name** – уникальное имя размера на чертеже; **Value** – значение размера; **Es** – верхнее отклонение; **Ei** – нижнее отклонение; **Hole** – допуск отверстия; **Arbor** – допуск вала; **IT** – допустимые качества для размера.

Для реализации выбора оптимальных параметров с помощью ГА в методе **Eval\_linopt** нужно выполнить несколько преобразований:

1. Сформировать модель расчета в терминах ГА, выполнив операцию **Create\_GA\_model**.
2. Сформировать набор технических ограни-

чений на выбор параметров согласно (11), выполнив операцию **Create\_limE**.

3. Установить размер популяции ГА и количество эволюций, выполнив операцию **SetGA\_Param**.

4. Выполнить оптимизацию, создав экземпляр класса **LineOptimize**.

5. Преобразовать полученную хромосому в параметры составляющих звеньев размерной цепи и заполнить документ расчета.

Таким образом, имеем три преобразования, в результате которых формируются следующие модели: информационная XML-модель размерной цепи (рисунок 2), необходимая для хранения результатов расчетов вне системы; модель **Chains** размерной цепи в виде списка, необходимая для манипуляций внутри системы; информационную XML-модель расчета размерной цепи, необходимая для работы ГА.

При задании параметров ГА особое внимание уделяется размеру популяции, который определяется на основании данных работы [11], и количеству тактов ГА.

Для определения количества тактов ГА (числа эпох, эволюций), обеспечивающего наилучшие результаты моделирования, проведем серию численных экспериментов по расчету размерных цепей методом полной взаимозаменяемости на основе математической модели (11).

ГА имеет следующие неизменяемые параметры в рамках эксперимента: разделение операторов селекции пар на стадии от 0 до 80 % – начальная стадия, свыше 80 % – окончательная стадия; вероятность кроссовера 95 %; вероятность мутации 5 %; вероятность смены популяции при стабилизации функции приспособленности 98 %; начало проверки стабилизации на 250 такте ГА; глубина проверки стабилизации функции приспособленности на 50 тактов назад; тип кроссовера – одноточечный. Вероятность кроссовера и мутации выбираются на основе общих рекомендаций для ГА. Остальные параметры выбираются исходя из практики моделирования с учетом производительности поиска. В экспериментах изменяться будет количество тактов ГА в диапазоне от 1000 до 22000 с шагом 3000, таким образом, имеем 8 расчетов.

Расчет выполняется методом полной взаимозаменяемости для размерных цепей с количеством звеньев 6 и 10. Размер хромосомы в генах, согласно вышеприведенным правилам, будет 12 и 20 генов. Диапазоны изменения значения генов аналогичны условиям математической модели (11), что приводит к одинаковому размеру популяции 240 особей, по условиям работы [11].

Задача численного эксперимента состоит в выявлении тенденции изменения точности расчетов целевой функции в зависимости от количества тактов ГА. Для данной целевой функции известно минимальное значение – оно равняется нулю, в этом случае параметры размерной цепи подобраны без погрешности. Для каждого фиксированного числа тактов ГА проведем по 51 расчету при неизменных параметрах, чтобы иметь возможность оценить параметры разброса значений целевой функции с помощью статистических характеристик, при этом по каждому расчету определяется реальное число выполнений

кроссовера, мутации и смен популяции. Тогда для всего эксперимента с фиксированным числом тактов ГА можно определить средние значения выполнения кроссовера, мутации и смены популяции, что в свою очередь позволяет ориентировочно оценить выборку из генеральной совокупности, по которой ГА находит решение. Для 12 генов с учетом размеров опорных множеств генеральная совокупность будет  $5,7063E+14$  особей, а для 24 генов –  $3,92577E+24$  особей. Размер выборки *SEL* определяем следующим образом

$$SEL = CR \cdot 2 + MT + CP \cdot PSZ, \quad (13)$$

где *CR* – количество выполнений кроссовера; *MT* – число мутаций; *CP* – число смен популяций; *PSZ* – размер популяции. Результаты экспериментов и размеры выборок, рассчитанные по формуле (13), сводим в таблицу 1. В таблице используются следующие обозначения: *Такты* – количество тактов ГА для одного эксперимента; *Выборка* – размер выборки; *Кв.откл.* – среднее квадратическое отклонение значений функции приспособленности в выборке.

Анализ тенденций изменения результатов будем проводить по среднеквадратическому отклонению каждого эксперимента (столбцы «Кв.откл.» в таблице 1), для этого выполним преобразование результатов в диапазон от 0 до 1 по осям: *x* – столбцы «Такты» таблицы 1; *y* – столбцы «Кв.откл.» в таблице 1. Это необходимо для корректного сравнения двух тенденций для 12 и 20 генов. В результате на рисунке 4 имеем сходные тренды изменения для всех экспериментов, где после 13000 (ось *x* на рисунке 4) тактов наблюдается стабилизация результатов среднеквадратического отклонения критерия (10) по оси *y*, что обеспечивает более устойчивые результаты расчетов.

Судя по графикам на рисунке 4, можно предположить, что они могут быть представлены одной нелинейной (степенной) регрессионной моделью с достаточной для практических расчетов достоверностью. Чтобы доказать это, проведем регрессионный анализ оценкой доверительного интервала изменения параметров регрессии по

Таблица 1 – Результаты экспериментов

Такты	Выборка	Кв.откл. (12 генов)	Кв.откл. (20 генов)
1000	2192	0,010405	0,001061294
4000	9230	0,002242	0,000266627
7000	16264	0,000719	0,000133294
10000	23304	0,000887	0,000117176
13000	30355	0,000498	9,25882E-05
16000	37383	0,00049	6,08235E-05
19000	44448	0,00048	8,56863E-05
22000	51472	0,000267	7,52941E-05

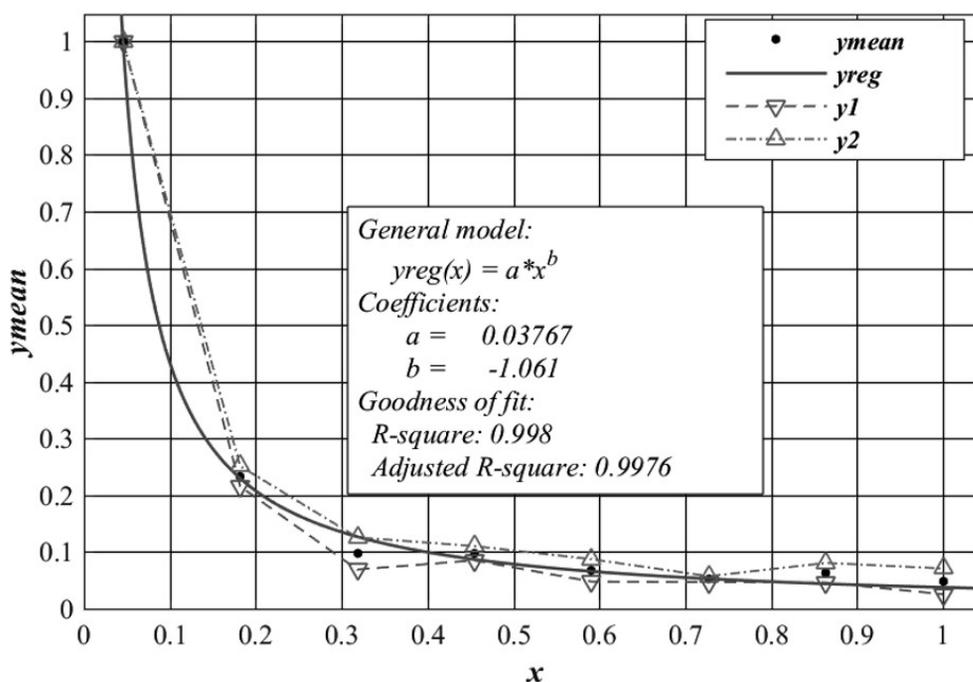


Рисунок 4 – Результаты экспериментов: ***y<sub>mean</sub>*** – усредненные значения экспериментов; ***y<sub>reg</sub>*** – результаты регрессионного анализа; ***y<sub>1</sub>*** – значения эксперимента № 1 – средние квадратические отклонения погрешности расчета («Кв.откл. (12 генов)» в таблице 1); ***y<sub>2</sub>*** – значения эксперимента № 2 – средние квадратические отклонения погрешности расчета («Кв.откл. (20 генов)» в таблице 1)

критерию Стьюдента.

Уравнение регрессии будем строить по усредненным данным от двух экспериментов, тогда, если результаты первого и второго экспериментов попадают в доверительный интервал регрессионной модели с заданной вероятностью, мож-

но сказать, что регрессия адекватно описывает результаты этих экспериментов. Подбор регрессионной модели (рисунок 4) выполняем в пакете Curve Fitting Toolbox 3.5.2 системы математических вычислений MATLAB R2015b.

Расчеты по оценке доверительного интерва-

ла выполняем в системе MathCAD на основе типового решения «Quality of Fit», приведенного в электронной книге Data Analysis Extension Pack. На рисунке 5 показано, что с вероятностью 99 % значения экспериментов попадают в доверительные интервалы регрессионной модели по всему множеству точек, здесь для расчетов используют асимптотическую дисперсионно-ковариационную матрицу оценок параметров.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

Рассмотрим расчет размерной цепи для левого конца выходного вала двухступенчатой четырехскоростной коробки скоростей. Здесь на выходной вал коробки скоростей 1 (рисунок 6) устанавливаются зубчатые колеса 2 и 3 с упором в торец ступени вала и в ступицы друг друга. Затем устанавливается дистанционная втулка 4, которая упирается во внутреннее кольцо подшипника 5. Весь пакет деталей в осевом положе-

нии фиксируется на валу наружным стопорным кольцом 6.

Сформулируем задачу расчета размерной цепи с учетом технологии обработки деталей. Имеем: зазор **AD** (рисунок 6) между торцом внутреннего кольца подшипника и торцом наружного стопорного кольца 6, наличие которого обеспечивает собираемость конструкции, следовательно, он будет замыкающим размером; размер **A6** для подшипника 5 степени точности **L0**; размер **A7** – ширина стопорного кольца с заданной точностью.

Необходимо обеспечить 100 % собираемость узла и найти точности размеров: **A2** – ступени вала 1 (диапазон квалитетов от 8 до 14, диапазон отклонений по модели (11) с учетом предпочтительных отклонений по ISO 286-2-2010 далее для всех); **A1** – определяющего положение стопорного кольца 6 на валу (диапазон квалитетов от 7 до 14); **A3** и **A4** – зубчатых колес 2 и 3

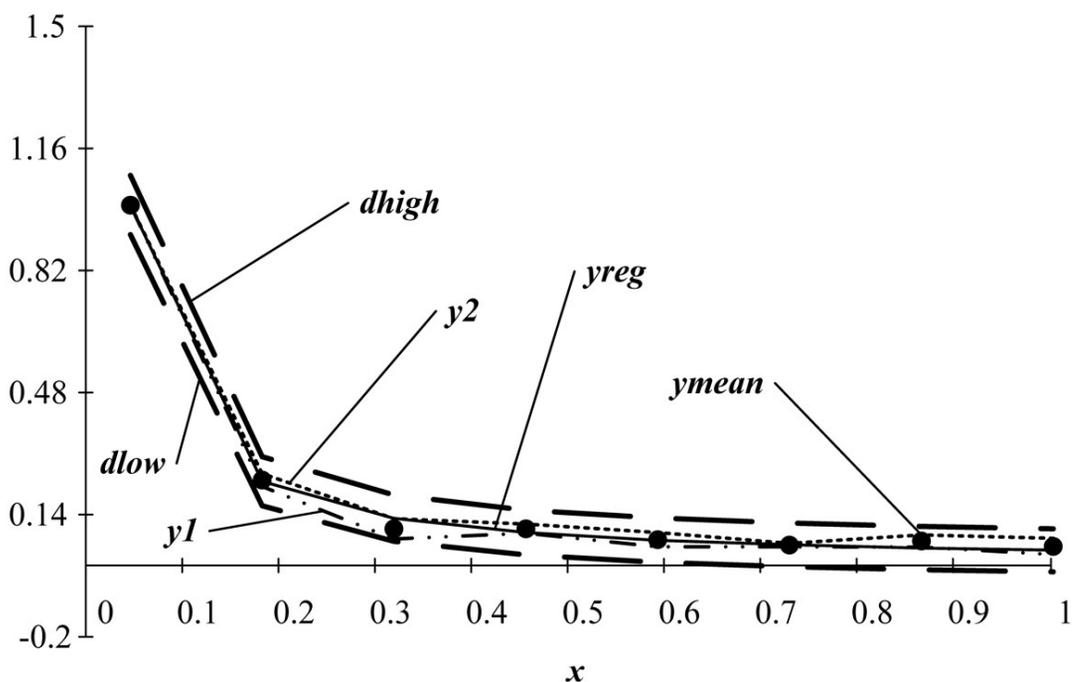
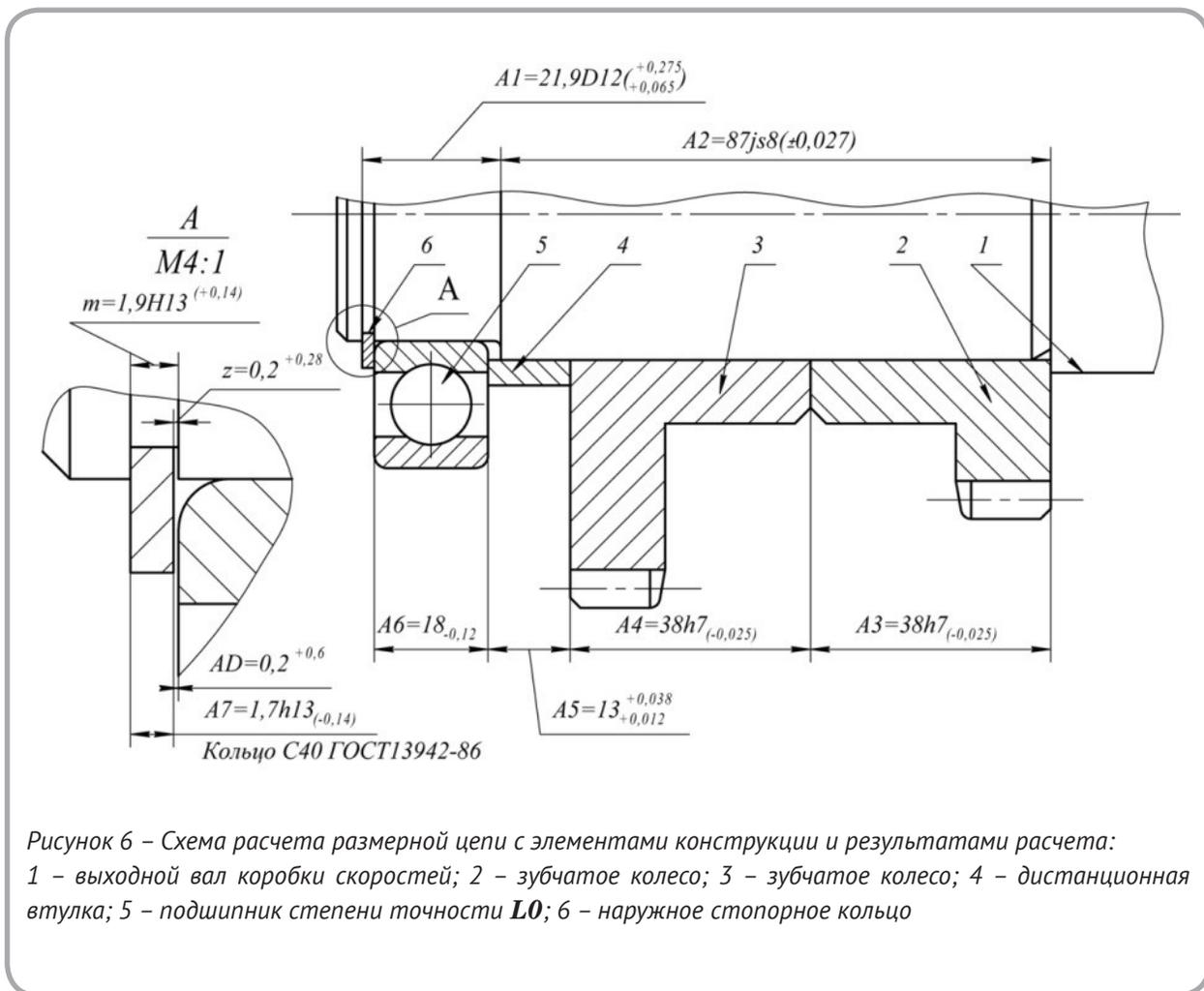


Рисунок 5 – Оценка доверительного интервала для регрессионной модели по всем экспериментальным точкам: **dhigh** – верхняя граница доверительного интервала; **dlow** – нижняя граница доверительного интервала



(диапазон квалитетов от 7 до 8);  $A5$  – дистанционной втулки 4, который может компенсировать все погрешности расчета остальных размеров (диапазон квалитетов от 7 до 14).

Задача решается моделированием расчета методом полной взаимозаменяемости со следующими параметрами ГА: размер популяции – 240 особей; количество тактов ГА – 13000. Определение допуска замыкающего звена зависит от ширины канавки  $m$  и сочетания допусков на канавку и стопорное кольцо (рисунок 6). Для получения приемлемых на практике результатов было произведено 5 расчетов средней длительностью 40 с каждый, что составило около 200 с. Результаты расчетов приведены на рисунке 6.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, получил дальнейшее развитие метод имитационного моделирования для решения проектной задачи расчета размерной цепи, который в отличие от существующих, пред-

полагает совместное использование критерия суммарной погрешности расчета и ГА при принятии проектного решения для обычных и связанных размерных цепей без дополнительных изменений в программных модулях, поскольку расчет обычных размерных цепей представляется здесь частным случаем общей модели расчета. Это позволяет снизить трудоемкость автоматизации за счет универсальности обобщенной математической модели. Учет влияния производственных и эксплуатационных факторов при принятии решения заложен в технических ограничениях модели, которые задает конструктор в режиме диалога, что позволяет частично решить вышеописанные проблемы существующих подходов. Этот метод реализован в САПР расчета размерных цепей, где для настройки ГА используются типовые параметры, полученные в данной работе на основе исследований предметной области. К недостаткам этого метода можно от-

нести несвязанное изменение допуска и отклонения размера внутри хромосомы, что приводит к увеличению области поиска и возможности при достаточно жестких условиях производства и функционирования конструкции, а также малом количестве тактов ГА, получить погрешность, стремящуюся к бесконечности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбраер, Р., Космачев, Ю. (2017), CETOL 6 Сигма: Осознанная целесообразность точности, Умное производство, 2017, № 40, режим доступа: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=212&group\\_id\\_4=68](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=212&group_id_4=68) (дата обращения: 13.02.2018).
2. Абзалов, А. Р., Иванова, В. Н., Хабаров, А. Е. (2016), Размерный анализ на основе параметрических моделей с использованием электронных таблиц, Современные наукоемкие технологии, 2016, № 12, режим доступа: <https://www.top-technologies.ru/pdf/2016/12-1/36467.pdf> (дата обращения: 13.02.2018).
3. Эл Дин (2013), NX 8.5 от Siemens PLM Software, САПР и графика, 2013, № 3, С. 40–44, режим доступа: <http://sapr.ru/article/23687> (дата обращения: 13.02.2018).
4. Анкин, А. В., Кузьминский, Д. Л. (2011), Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи, Известия МГТУ, 2011, № 2, режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-dlya-rascheta-prostranstvennoy-razmernoj-tsepi> (дата обращения: 13.02.2018).
5. Янюкина, М. В., Болотов, М. А. (2016), Моделирование взаимосвязанных размерных цепей в авиационной технике, Сборник материалов Международной конференции и молодежной школы «Информационные и нанотехнологии», Самара, 2016, С. 749–751,

## REFERENCES

1. Birbraer R., Kosmachev, U. (2017), CETOL 6 Sigma: Accurate Reasonable Precision [CETOL 6 Sigma: Osozannaja celesoobraznost' tochnosti], Smart Manufacturing, 2017, no.40, available at: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=212&group\\_id\\_4=68](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=212&group_id_4=68) (accessed 13.02.2018).
2. Abzalov, A. R., Ivanova, V. N., Khabarov, A. E. (2016), Dimension analysis based on parametric models and spreadsheet calculations [Razmernyj analiz na osnove parametriceskih modelej s ispol'zovaniem jelektronnyh tablic], Modern high technologies, 2016, №12, available at: <https://www.top-technologies.ru/pdf/2016/12-1/36467.pdf> (accessed 13.02.2018).
3. Al Dean (2013), NX 8.5 Siemens PLM Software [NX 8.5 ot Siemens PLM Software], CAD and graphics, 2013, №3, pp. 40–44, available at: <http://sapr.ru/article/23687> (accessed 13.02.2018).
4. Ankin, A. V., Kuzminsky, D. L. (2011), Software development for calculation of a space dimensional circuit [Razrabotka programmnogo obespechenija dlja rascheta prostranstvennoj razmernoj cepej], Izvestiya MGTU MAMI, 2011, № 2, available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-dlya-rascheta-prostranstvennoy-razmernoj-tsepi> (accessed 13.02.2018).
5. Yanyukina, M. V., Bolotov, M. A. (2016), Modeling of the interconnected dimensional circuits in an aeronautics [Modelirovanie vzaimosvjazannyh

- режим доступа: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Informacionnye-tehnologii-i-nanotehnologii/Modelirovanie-vzaimosvyazannyh-razmernyh-cepei-v-aviacionnoi-tehnike-60836/1/749-751.pdf> (дата обращения: 03.01.2019).
6. Печенин, В. А., Болотов, М. А., Рузанов, Н. В., Янюкина, М. В. (2016), Исследование неопределённостей измерений геометрических параметров профилей лопаток компрессора газотурбинного двигателя, Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2016, № 2, режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-neopredelyonnostey-izmereniy-geometricheskih-parametrov-profiley-lopatok-kompressora-gazoturbinного-dvigatelya> (дата обращения: 03.01.2019).
  7. Журавлёв, Д. А., Шабалин, А. В. (2015), Методика пространственного размерного анализа в системе ГеПАРД, Вестник ИрГТУ, 2015, № 8 (103), С. 58–65, режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/metodika-prostranstvennogo-razmernogo-analiza-v-sisteme-gepard> (дата обращения: 30.01.2018).
  8. Соломахо, В. Л., Спесивцева, Ю. Б. (2009), Комплексный подход к расчету размерных цепей, Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение, 2009, № 8, С. 63–70, режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_24811191\\_94277169.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_24811191_94277169.pdf) (дата обращения: 30.01.2018).
  9. Гладков, Л. А., Курейчик, В. В., Курейчик, В. М., Сороколетов, П. В. (2009), *Биоинспирированные методы в оптимизации*, М., ФИЗМАТЛИТ, 2009, 384 с.
  10. Палей, М. А., Романов, А. Б., Брагинский, В. А. (2001), *Допуски и посадки: Справочник : В 2 ч.*, СПб., Политехника, 2001, Ч. 2, 608 с.
  11. Фролов, В. В. (2018), *Определение размера популяции генетического алгоритма для задач* *размernih cepej v aviacionnoj tehnikе*, Information technology and nanotechnology (ITNT-2016), Samara, 2016, pp. 749–751, available at: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Informacionnye-tehnologii-i-nanotehnologii/Modelirovanie-vzaimosvyazannyh-razmernyh-cepei-v-aviacionnoi-tehnike-60836/1/749-751.pdf> (accessed 03.01.2019).
  6. Pechenin, V. A., Bolotov, M. V., Ruzanov, N. V., Yanyukina, M. V. (2016), Study of uncertainty of measuring geometrical parameters of gas turbine engine compressor blade profiles [*Issledovanie neopredeljonnostej izmerenij geometricheskih parametrov profilej lopatok kompressora gazoturbinного dvigatelja*], Vestnik of the Samara State Aerospace University, 2016, V. 15, no. 2., pp. 162–170, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-neopredelyonnostey-izmereniy-geometricheskih-parametrov-profiley-lopatok-kompressora-gazoturbinного-dvigatelya> (accessed 03.01.2019).
  7. Zhuravlev, D. A., Shabalin, A. V. (2015), Methods of spatial dimensional analysis in GePARD system [*Metodika prostranstvennogo razmernogo analiza v sisteme GePARD*], Bulletin of ISTU, 2015, № 8 (103), pp. 58–65, available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/metodika-prostranstvennogo-razmernogo-analiza-v-sisteme-gepard> (accessed 30.01.2018).
  8. Solomakho, V. L., Spesivtseva, Yu. B. (2009), The complex approach to calculation of dimensional circuits, Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. Machine Science [*Kompleksnyj podhod k raschetu razmernih cepej*], 2009, no.8, pp. 63–70, available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_24811191\\_94277169.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_24811191_94277169.pdf) (accessed 30.01.2018).
  9. Gladkov, L. A., Kureichik, V. V., Kureichik, V. M., Sorokoletov, P. V. (2009), *Bioinspirirovannye metody v optimizacii* [Bio-inspired methods in optimization], Moscow, FIZMATLIT, 2009, 384 p.

*дискретной оптимизации в САПР*, Системный анализ и прикладная информатика, 2018, № 3, С. 9–16, <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-3-9-16>.

10. Paley, M. A., Romanov, A. B., Braginsky, V. A. (2001), *Dopuski i posadki: Spravochnik : V 2 ch.* [Tolerances and Landings: A Handbook: In 2 parts], St. Petersburg, Polytechnic, 2001, Part 2, 608 p.

11. Frolov, V. V. (2018), *Opredelenie razmera populjacji geneticheskogo algoritma dlja zadach diskretnoj optimizacii v SAPR* [Determining the size of the population of the genetic algorithm for the problems of discrete optimization in CAD], System analysis and applied information science, 2018, no 3, pp. 9–16, <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-3-9-16>.

*Статья поступила в редакцию 03. 10. 2019 г.*