

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)
УДК 004.896: 621.713.12

Поступила в редакцию 24.09.2018
Received 24.09.2018

Принята к публикации 26.10.2018
Accepted 26.10.2018

Метод генетического поиска для проектного расчета размерных цепей

В. В. Фролов

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: vvicfrol@rambler.ru

Аннотация. Предложен метод генетического поиска для решения задач проектного расчета линейных размерных цепей, который позволяет подбирать допуски размеров и отклонения для достижения точности замыкающего звена при полной и неполной взаимозаменяемости с минимизацией ошибки подбора. В основе метода лежит представление линейной размерной цепи в виде нейронной сети прямого распространения без обратных связей с квадратичной функцией активации для подбора допусков размеров и отклонений. При генетическом поиске входы нейронной сети преобразуются в гены хромосомы. Метод предполагает решение проектной задачи расчета размерных цепей в виде задачи дискретной оптимизации с ограничениями и ориентирован на автоматизацию расчета размерных цепей в системах автоматизированного проектирования конструкторского и технологического назначения. Сравнительный анализ предложенного метода с традиционными расчетами показывает, что он позволяет находить решения с минимальной ошибкой для стандартных сочетаний допусков и отклонений.

Ключевые слова: размерная цепь, замыкающее звено, метод полной взаимозаменяемости, генетический алгоритм, хромосома, нейронная сеть прямого распространения, дискретная оптимизация, математическая модель

Для цитирования. Фролов, В. В. Метод генетического поиска для проектного расчета размерных цепей / В. В. Фролов // Информатика. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 103–114.

Genetic search method for design calculation of dimensional chains

Vyacheslav V. Frolov

V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine
E-mail: vvicfrol@rambler.ru

Abstract. The method of genetic search for a solution of problems of design calculation of linear dimensional chains is offered. The method allows to select dimensional tolerances and deviation for achievement of closing link accuracy at complete and incomplete interchangeability with minimization of selection error. Representation of a linear dimensional chain in the form of feedforward neural network without feedback couplings with square function of activation for selection of dimensional tolerances and deviations is the cornerstone of a method. By genetic search the inputs of neural network will be transformed to chromosome genes. The method assumes a solution of a design problem of calculation of dimensional chains in the form of a problem of discrete optimization with restrictions. The offered method is oriented to automation of calculation of dimensional chains in computer-aided engineering systems of design and technological assignment. Comparative analysis of the offered method with traditional calculations shows that it allows to find solutions with minimal error for standard combinations of dimensional tolerances and deviations.

Keywords: dimensional chain, the closing link, method of complete interchangeability, genetic algorithm, chromosome, feedforward neural network, discrete optimization, mathematical model

For citation. Frolov, V. V. Genetic search method for design calculation of dimensional chains. *Informatics*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 103–114 (in Russian).

Введение. В конструкторской подготовке производства проектный расчет размерных цепей является одним из важных этапов, от которого зависят работоспособность конструкции и себестоимость ее изготовления. Этот этап достаточно трудоемкий и требует высокой квалификации конструктора, поэтому его автоматизация актуальна при создании систем автоматизированного проектирования (САПР) конструкторского назначения.

На этапе конструкторской подготовки производства применяются проектный и проверочный расчеты размерных цепей. Автоматизация проверочного расчета не вызывает каких-либо трудностей, так как она достаточно хорошо формализована и не требует решения оптимизационных задач. Проблемы возникают с автоматизацией проектного расчета, когда необходимо решить задачу выбора наиболее приемлемого решения из множества допустимых решений в условиях неопределенности. Неопределенность обусловлена большим количеством технологических и эксплуатационных факторов, которые влияют на конструкцию узла. При этом нужно различать методы достижения заданной точности исходного звена и способы подбора допусков составляющих звеньев в рамках данных методов. М. А. Палей в работе [1] отмечает, что существуют следующие методы: полной взаимозаменяемости, вероятностный, групповой взаимозаменяемости, пригонки, регулирования. Для этих методов основной проблемой при решении проектной задачи является стратегия подбора допусков и отклонений составляющих звеньев, обеспечивающая необходимые допуски и отклонения замыкающего звена.

В современных САПР в силу указанных выше причин чаще всего автоматизируется решение проверочной задачи. В частности, для данного направления существуют следующие программные решения: расчет размерных цепей по известным формулам для полной и неполной взаимозаменяемости, реализованный в САПР Компас в виде специальной библиотеки [2] и в Inventor 2016 в виде специального калькулятора, который использует метод полной взаимозаменяемости [3]; моделирование состояний конструкции и выбор лучшего с учетом полной и неполной взаимозаменяемости, при этом может быть использован метод Монте-Карло для генерации случайных сочетаний размеров в системе SETOL 6 Сигма [4], которая работает в связке с Pro/ENGINEER; размерный анализ на основе параметрических моделей [5] в системе NX 8.5 от Siemens PLM Software [6]. В САПР SolidWorks также реализуется идея моделирования сочетания действительных размеров на твердотельной модели. В частности, в работе [7] описывается один из таких подходов.

А. А. Ивахненко в работе [8] рассматривает следующую классификацию стратегий подбора (способов): попытки (для единичного и мелкосерийного производства), пропорциональное влияние (для средне- и крупносерийного производства), экономическое обоснование (для массового и автоматизированного производства), равные допуски.

Наиболее приемлемым с точки зрения оптимизации выбора заданных параметров является способ попыток (пробных расчетов), поскольку он позволяет учитывать достаточно большое количество особенностей конструкции при ее изготовлении и эксплуатации. В настоящее время стратегия подбора допусков и отклонений составляющих звеньев в этом способе не определена и полностью зависит от квалификации конструктора. Если решать задачу подбора как задачу дискретной оптимизации с ограничениями, то получим модификацию способа пробных расчетов для целей автоматизации проектирования. При этом необходимо, чтобы математическая модель данного способа могла быть использована в различных методах расчета с минимальными доработками для снижения трудоемкости автоматизации расчета размерных цепей. Желательно иметь набор типовых программных решений, который покрывает все множество методов расчета размерных цепей.

Цель исследования – снижение трудоемкости автоматизации проектного расчета линейных сборочных размерных цепей за счет использования типовых решений на основе математических моделей искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетического алгоритма (ГА), определяющего стратегию направленного поиска.

Метод генетического поиска для автоматизации проектного расчета линейных размерных цепей на основе эволюционных вычислений. В общем виде метод имеет три аспекта.

Проблемный аспект. Необходимо выбрать наилучшее сочетание допусков и отклонений составляющих звеньев размерной цепи, которые обеспечат получение предельных размеров замыкающего звена, попадающих в допуск, заданный конструктором с учетом особенностей функционирования узла.

Онтологический аспект. При подборе допусков и отклонений необходимо учитывать:

- особенности механической обработки поверхностей, связанных с составляющими звеньями;
- выбор допусков и отклонений из множества допустимых в соответствии со стандартами ISO 286-1:2010 и ISO 286-2:2010;
- результаты расчета, полученные при любом сочетании исходных данных с оценкой приближения к допуску замыкающего звена;
- исходные данные для расчета, которыми являются допуск и отклонение замыкающего звена; маршрут обработки поверхностей, связанных со звеньями размерной цепи; характеристики методов обработки по точности.

Процедурный аспект. Решение состоит из следующих действий:

1) получить исходные данные (номинальные размеры звеньев размерной цепи; множества допустимых отклонений и допусков для каждого звена размерной цепи; номинальный размер и предельные отклонения для замыкающего звена; метод расчета; прогнозируемый процент брака и риск в случае метода неполной взаимозаменяемости);

2) выбрать допуски и отклонения;

3) выполнить проверочный расчет с оценкой погрешности;

4) при необходимости выбрать звено для компенсации имеющейся погрешности.

Основой метода генетического поиска являются математические модели простых и связанных сборочных размерных цепей в виде ИНС. Для разработки этих моделей используем представление формального нейрона в векторной форме, предложенное Е. В. Бодянским и О. Г. Руденко в работе [9, с. 14]:

$$y_j = \psi(w_j^T x), \quad x = (x_0, x_1, \dots, x_n)^T, \quad w_j = (w_{j,0}, w_{j,1}, \dots, w_{j,n})^T, \quad w_{j,0} = \theta_j, \quad x_0 \equiv 1, \quad (1)$$

где x – вектор входов; w – вектор синаптических весов; ψ – функция активации; y – выход нейрона; j – номер нейрона.

Математическая модель проектного расчета простых размерных цепей в данном случае будет следующей:

1. Функция активации формального нейрона для расчета $\psi(u) = \begin{cases} u^2, & \text{если } u \geq 0; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$

где u – внутренний сигнал, который определяется как $u = w_j^T x$.

2. Из множества значений выхода формального нейрона (1) необходимо выбрать минимальное значение, такое, что верно выражение

$$y^* = \min_{\forall y \in Y} \{y\}, \quad Y = \left\{ y : \left(y = \psi(w^T x) \right) \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^k A(x)_i = 1 \right) \right\}, \quad (2)$$

где $A(x)_i$ – предикатная формула, которая задает правила отбора значений в множество Y ; k – общее количество правил выбора допустимых значений.

3. В модели (2) для различных расчетов могут быть использованы два типа предикатных формул:

$$A(x) = (l_i \leq x_i \leq r_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad n = m - 1, \quad l_i = \min_{\forall d \in D_i} \{d\}, \quad r_i = \max_{\forall d \in D_i} \{d\}; \quad (3)$$

$$A(x) = \bigwedge_{i=1}^n (\exists d \in D_i)(d = x_i) = 1, \quad (4)$$

где D_i – допустимое множество значений; x_i – общее количество размеров в размерной цепи.

4. В зависимости от типа и этапов расчета размерных цепей для обобщенной модели (2) используются несколько подстановок.

При проектном расчете методом полной взаимозаменяемости применяются подстановки

$$x_i \leftrightarrow T_i, \quad w_i \leftrightarrow 1, \quad w_0 \leftrightarrow -T_\Delta, \quad D_i \leftrightarrow [\delta]_{p(Dm) \otimes l_j}, \quad p: Dm \rightarrow CD, \quad \forall l \in IT, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где T_i – допуск звена, составляющего размерную цепь; T_Δ – допуск замыкающего звена; Dm – множество диапазонов размеров; CD – множество кодов диапазонов; IT – множество качеств; $[\delta]_{p(Dm) \otimes l_j}$ – вектор-строка, представляющая множество допусков для заданного размера и качества.

Для метода неполной взаимозаменяемости подстановки будут выглядеть следующим образом:

$$x_i \leftrightarrow T_i^2, \quad w_i \leftrightarrow \lambda_i^2, \quad w_0 \leftrightarrow -\frac{T_\Delta^2}{t_\Delta^2}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где λ_i^2 – коэффициент, определяемый законом рассеяния звена размерной цепи; t_Δ^2 – квадрат коэффициента риска для замыкающего звена.

Подстановки при подборе отклонений для заданных допусков выражаются формулами

$$x_i \leftrightarrow \frac{es_i + f(T_i, es_i)}{2}, \quad w_i \leftrightarrow \xi_i, \quad w_0 \leftrightarrow -\Delta_{0\Delta}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где es – верхнее отклонение звена размерной цепи; ξ_i – передаточное отношение звена размерной цепи; $\Delta_{0\Delta}$ – середина поля допуска замыкающего звена.

Подстановки (7) получены исходя из следующих рассуждений. При подборе отклонений основное условие, которое нужно выполнить, описывается известной формулой для определения середины поля допуска замыкающего звена через середины полей допусков составляющих звеньев:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta_{0i}. \quad (8)$$

Выражаем нижнее отклонение через верхнее отклонение и допуск:

$$T_i^2 = (es - ei)^2 \rightarrow ei = \begin{cases} T + es, & \text{если } (T + es) < es, \\ es - T & \text{в противном случае} \end{cases} \rightarrow ei = f(T, es). \quad (9)$$

В формулу

$$\Delta_{0i} = \frac{es_i + ei_i}{2} \quad (10)$$

подставляем (9) и заменяем в (8) середину поля допуска составляющего звена полученным выражением:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left[\frac{es_i + f(T_i, es_i)}{2} \right]. \quad (11)$$

Учитывая вышеизложенное, математическая модель проектного расчета связанных размерных цепей может быть представлена в матричном виде, предложенном для описания ИНС в работе [9, с. 33]. Тогда ИНС, моделирующую связанные размерные цепи (рис. 1), можно представить на рис. 2 с учетом следующих подстановок: $A_i \rightarrow x_i$, $B_i \rightarrow x_j$, $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{4,6}$.

Математическая модель для ИНС на рис. 2 в общем виде запишется следующим образом:

$$y = \Psi(x), \quad \Psi(x) = \Psi^{[2]} \left(W^{[2]} \Psi^{[1]} \left(W^{[1]} x \right) \right), \quad \Psi^{[s]} = \text{diag}(\psi_0, \dots, \psi_{ne})_{[s]}, \quad (12)$$

где $\Psi^{[s]}$ – диагональный нелинейный оператор; ne – количество нейронов в каждом слое; $W^{[s]}$ – матрица синаптических весов.

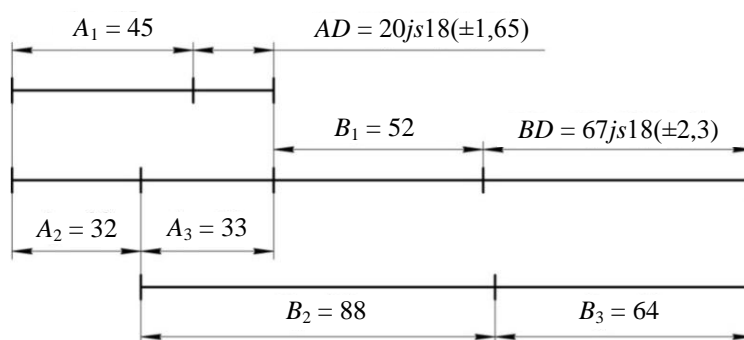


Рис. 1. Связанные размерные цепи

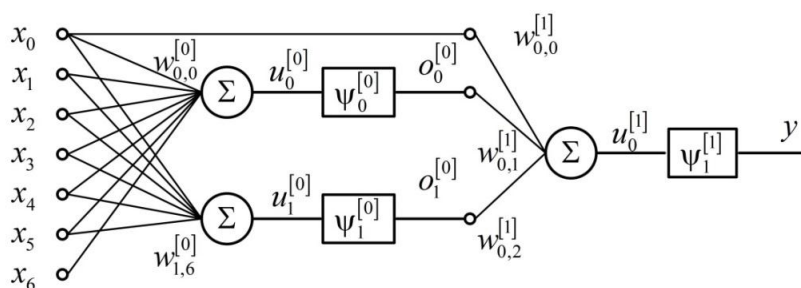


Рис. 2. Модель связанных размерных цепей в виде ИНС:

x_i – вход сети с искомыми параметрами звеньев размерной цепи; $w_{i,j}^{[s]}$ – синаптические веса;

$\psi_i^{[s]}$ – функция активации; y – выход ИНС; $u_i^{[s]}$ – внутренний сигнал нейрона;

$o_i^{[s]}$ – выход отдельного нейрона; i – номер нейрона; j – номер входа; s – номер слоя

Матрицы синаптических весов для каждого слоя формируются следующим образом:

1. Синаптические веса матрицы первого слоя для модели (12) определяются в зависимости от метода расчета полной или неполной взаимозаменяемости, а также этапа расчета (подбора допусков или отклонений):

$$W^1 = [w_{i,j}^1]_{ne \times (n+1)}, \quad i = \overline{0, ne}, \quad j = \overline{0, (n+1)}, \quad ne = c - 1, \quad (13)$$

где n – количество размеров в размерных цепях без учета замыкающих размеров; c – количество размерных цепей в расчете. Конкретные значения синаптических весов в (13) определяются по правилам

$$w_{i,0}^1 = \begin{cases} -T_{\Delta}, & \text{если полная взаимозаменяемость,} \\ -\frac{T_{\Delta}^2}{t_{\Delta}^2}, & \text{если неполная взаимозаменяемость,} \\ -\Delta_{0\Delta}, & \text{если подбор отклонений;} \end{cases} \quad (14)$$

$$w_{i,j}^1 = \begin{cases} 0, & \text{если исключен из расчета,} \\ 1, & \text{если увеличивающее звено или подбор допусков,} \\ -1, & \text{если уменьшающее звено.} \end{cases} \quad (15)$$

Например, для размерной цепи на рис. 1 при решении задачи методом полной взаимозаменяемости матрица (13) согласно (14) и (15) на этапе подбора допусков будет иметь вид

$$W^{[1]} = \begin{vmatrix} -3,3 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -4,6 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

2. Синаптические веса матрицы второго слоя находятся из выражений

$$W^{[2]} = [w_{i,j}^{[2]}]_{1 \times (m+1)}, \forall j (w_{0,j}^{[2]} = 1), j = \overline{1, m}, w_{0,0}^{[2]} = 0. \quad (16)$$

Диагональные нелинейные операторы по слоям выглядят следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi^{[1]} = \text{diag}(\psi_0, \psi_i, \dots, \psi_{ne})_{[1]}, \forall \psi_i^{[1]} \left(\psi_i^{[1]}(u_i) = \begin{cases} u_i^2, & \text{если } u_i \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \right); \\ \Psi^{[2]} = \text{diag}(\psi_0)_{[2]}, \psi_0^{[2]}(u_0) = k \cdot u_0, k = 1. \end{array} \right. \quad (17)$$

Таким образом, процедурный аспект метода при расчете связанных размерных цепей может быть модифицирован следующим образом, начиная с п. 2:

2. Формируем вектор входов.
 - 2.1. Формируем вектор входов из всех размеров, составляющих размерную цепь.
 - 2.2. Удаляем замыкающие размеры.
 - 2.3. Удаляем дублирующие размеры так, чтобы оставался один размер с уникальным именем.
3. Формируем нейронную сеть согласно (12)–(17) с учетом следующих положений:
 - 3.1. ИНС имеет два слоя.
 - 3.2. Выходной слой имеет один нейрон с линейной функцией активации.
 - 3.3. Количество нейронов скрытого слоя определяется количеством связанных размерных цепей.
 - 3.4. Матрицы синаптических коэффициентов формируются на основе правил (13)–(16).
4. Решаем задачу дискретной оптимизации для подбора допусков с помощью ГА, где хромосома – это вектор входов ИНС, а сама ИНС является функцией приспособленности ГА.
5. Решаем задачу дискретной оптимизации для подбора отклонений с помощью ГА аналогично п. 4.
6. Проводим проверочный расчет с определением погрешности для каждой размерной цепи.
7. При необходимости выбираем звено для компенсации полученной погрешности в каждой размерной цепи.

Задачи дискретной оптимизации для пп. 4 и 5 процедурного аспекта формулируются на основе математической модели (2) с подстановкой модели ИНС (12) вместо модели отдельного нейрона (1) с техническими ограничениями (3), (4):

$$y^* = \min_{y \in Y} \{y\}, Y = \left\{ y : (y = \Psi(x)) \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^k A(x)_i = 1 \right) \right\}. \quad (18)$$

На основе (18) можно вывести обобщенную математическую модель расчета размерных цепей различных типов с использованием ИНС прямого распространения без обратных связей, поскольку при расчете одной размерной цепи модель (12) состоит из одного слоя, содержащего один нейрон:

$$y = \Psi(x), \Psi(x) = \Psi^{[1]}(W^{[1]}x), \Psi^{[1]} = \text{diag}(\psi_1)_{[1]}. \quad (19)$$

В модели (19) матрица синаптических весов формируется аналогично матрице (13) с учетом того, что расчет производится для одной размерной цепи и $c = 1$.

Сравнительный анализ эффективности проектных расчетов размерных цепей классическим способом одного качества и генетическим поиском для методов полной и неполной взаимозаменяемости. Решение проектной задачи классическим способом возьмем из источника [10, с. 96–101], прошедшего необходимое рецензирование, с поэтапным разбором решения. На основе чертежа из [10, с. 211, рис. П8.2] составим схему размерной цепи с упрощенным изображением отдельных элементов конструкции (рис. 3). Тогда формулировка проектной задачи расчета размерной цепи будет следующей: обеспечить в конструкции осевой зазор AD (см. рис. 3) между торцом крышки (размер $A10$) и наружным кольцом подшипника (размер $A1$) при реализации методов полной и неполной взаимозаменяемости.

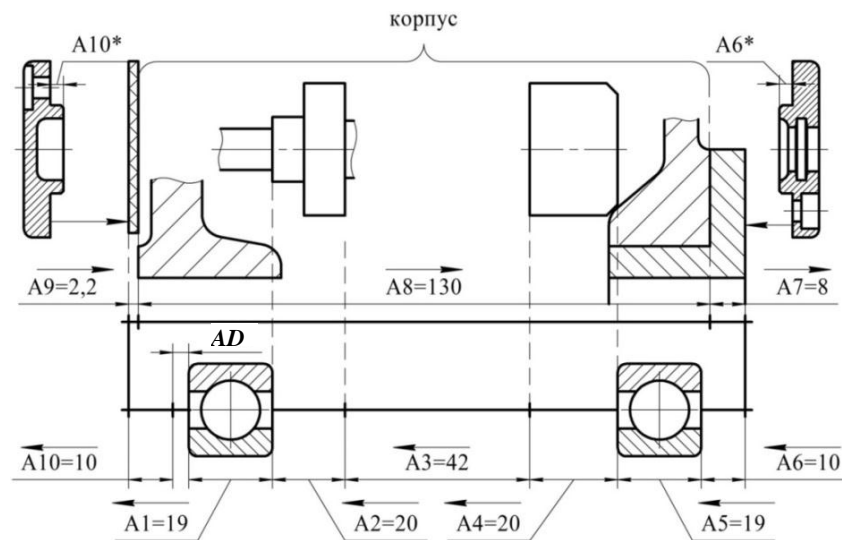


Рис. 3. Схема размерной цепи с элементами конструкции:

$A1$ – ширина подшипника; $A2$ – расстояние между торцами вала; $A3$ – ширина ступицы зубчатого колеса; $A4$ – длина дистанционной втулки; $A5$ – ширина подшипника; $A6$ – линейный размер крышки; $A7$ – линейный размер фланца стакана; $A8$ – габариты корпуса конструкции; $A9$ – размер прокладки; $A10$ – линейный размер крышки; $A10^*$, $A6^*$ – справочные размеры

Проанализировав схему размерной цепи на рис. 3, определим ограничения, которые можно учесть при проектном расчете этой цепи:

1. Для допусков и отклонений каждого звена размерной цепи следует использовать множество допустимых значений, определенное в базе данных САПР. Это ограничение позволит сузить множество поиска для ГА при практических расчетах, поскольку проектировщик может увеличивать или уменьшать диапазон поиска значений исходя из требований эксплуатации или производства.

2. Размер $A1$ эквивалентен размеру $A5$, поскольку они относятся к одинаковым подшипникам, судя по размерам наружного и внутреннего колец.

Сформулируем задачу расчета размерных цепей в терминах предлагаемого подхода для метода полной взаимозаменяемости при выборе допусков:

1. Выбрать минимальное значение ИНС (19) согласно (18) с учетом ограничений 1 и 2:

$$y^* = \min_{\forall y \in Y} \{y\}, Y = \left\{ y : (y = \Psi(x)) \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^2 A(x)_i = 1 \right) \right\},$$

$$x = (x_0, x_1, \dots, x_{10})^T, x_0 \equiv 1,$$

$$\Psi(x) = \Psi^{[1]}(W^{[1]}x), \Psi^{[1]} = \text{diag}(\psi_1)_{[1]}, \psi_1(u_1) = \begin{cases} u_1^2, & \text{если } u_1 \geq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$W^{[1]} = \left| -T_{\Delta} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \right|,$$

$$T_{\Delta} = 0,25,$$

$$\begin{cases} A(x)_1 = \bigwedge_{j=1}^{10} (\exists d \in D_j)(d = x_j) = 1, \\ A(x)_2 = (x_1 = x_5) = 1, \\ D_1 = \{0,009; 0,013; 0,021; 0,033; 0,052; 0,084; 0,13; 0,21; 0,33; 0,52; 0,84; 1,3\}, \\ \dots \\ D_{10} = \{0,006; 0,009; 0,015; 0,022; 0,036; 0,058; 0,09; 0,15; 0,22; 0,36; 0,58; 0,9\}. \end{cases}$$

2. Для решения данной задачи использовать параллельный ГА, предложенный в работе [11], где хромосома формируется из $x = (x_0, x_1, \dots, x_{10})^T$.

В результате получим задачу дискретной оптимизации, решаемую с помощью эволюционных вычислений. В табл. 1 приведем данные классических расчетов, необходимые для сравнительного анализа. Аналогично можно сформулировать задачу выбора отклонений и для метода неполной взаимозаменяемости. Выбор допусков и отклонений выполняется согласно стандарту ISO 286-2:2010. Рассмотрим два случая: для всех возможных значений отклонений по данному стандарту, что отражено в табл. 2 словом «все», и для предпочтительных значений отклонений, что отражено словом «предпочт.». В модели это отразится в содержании множеств D_j .

Проведены четыре расчета (см. табл. 2) методом генетического поиска с учетом того, что диапазон квалитетов составляет от 6 до 16, а диапазон отклонений задан множеством $\{a, b, c, d, e, f, g, h, js, m, n, p, r, s, u, x, A, B, C, D, E, F, G, H\}$. Модель позволяет выделить только потенциально необходимые квалитеты и отклонения из условий производства или эксплуатации. В приведенных экспериментальных расчетах указанные множества остаются неизменными для того, чтобы определить возможности предлагаемого метода при решении задачи с минимальным вмешательством проектировщика. Таким образом, получаем область поиска на множестве сочетаний допусков с мощностью 12^{10} и на множестве сочетаний отклонений с мощностью 24^{10} . Существующие методы для выбора отклонений уменьшают область поиска до 3^{10} за счет требования назначать отклонения h, H, js , при этом уменьшается возможность подбора наиболее эффективных отклонений при эксплуатации узла. Аналогичная ситуация наблюдается и при подборе допусков. Следуя требованиям к способам подбора, проектировщик снижает размерность области поиска до одного квалитета. При этом потенциально на каждый размер можно выбрать один из 12 квалитетов, что дает возможность учесть больше технических условий для конкретного размера.

В результате при использовании существующих методов проектировщики жертвуют разнообразием ради возможности упростить решение, а это не всегда оправдано. Численную оценку разнообразия допусков можно выразить или через дисперсию, или через среднее квадратическое отклонение. Величина допуска j -го звена размерной цепи, как известно, зависит от квалитета и размера, что выражается количеством единиц допуска k_j и значением единицы до-

пуска i_j соответственно. Следовательно, необходимо рассматривать среднее квадратическое отклонение количества единиц допуска

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (k_j - \bar{k})^2}{n-1}}. \quad (20)$$

Таблица 1

Результаты классического расчета по данным В. И. Анухина для методов полной взаимозаменяемости [10, с. 97, табл. 4.3] и неполной взаимозаменяемости [10, с. 101, табл. 4.5]

Тип	Размер	Номинальное значение размера	Взаимозаменяемость					
			неполная			полная		
			<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>
0	<i>AD</i>	0,2	0,25	0	–	0,25	0	–
–1	<i>A1</i>	19	0	–0,084	<i>h10</i>	0	–0,021	<i>h7</i>
–1	<i>A2</i>	20	0	–0,084	<i>h10</i>	0	–0,021	<i>h7</i>
–1	<i>A3</i>	42	0	–0,1	<i>h10</i>	0	–0,039	<i>h8</i>
–1	<i>A4</i>	20	0,029	–0,084	<i>h10</i>	0	–0,021	<i>h7</i>
–1	<i>A5</i>	19	0	–0,084	<i>h10</i>	0	–0,021	<i>h7</i>
–1	<i>A6</i>	10	0	–0,029	<i>js10</i>	0,0075	–0,0075	<i>js7</i>
1	<i>A7</i>	8	0	–0,058	<i>h10</i>	0	–0,015	<i>h7</i>
1	<i>A8</i>	130	0	–0,16	<i>h10</i>	0	–0,063	<i>h8</i>
1	<i>A9</i>	2,2	0,036	–0,004	–	0,1085	0,0965	–
–1	<i>A10</i>	10	0,029	–0,029	<i>js10</i>	0,011	–0,011	<i>js8</i>

Таблица 2

Результаты применения метода генетического поиска

Размер	Взаимозаменяемость											
	полная (все)			полная (предпочт.)			неполная (все)			неполная (предпочт.)		
	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>
<i>AD</i>	0,25	0	–	0,25	0	–	0,25	0	–	0,25	0	–
<i>A1</i>	0,173	0,16	<i>B6</i>	0	–0,013	<i>h6</i>	0	–0,052	<i>h9</i>	0,059	0,007	<i>G9</i>
<i>A2</i>	0	–0,021	<i>h7</i>	0	–0,021	<i>h7</i>	0,059	0,007	<i>G9</i>	0,212	0,16	<i>B9</i>
<i>A3</i>	0,056	0,017	<i>n8</i>	–0,13	–0,169	<i>c8</i>	0,019	–0,019	<i>js8</i>	0,073	0,034	<i>r8</i>
<i>A4</i>	0,048	0,035	<i>s6</i>	0,041	0,028	<i>r6</i>	0,053	0,02	<i>F8</i>	0,073	0,04	<i>E8</i>
<i>A5</i>	0,173	0,16	<i>B6</i>	0	–0,013	<i>h6</i>	0	–0,052	<i>h9</i>	0,059	0,007	<i>G9</i>
<i>A6</i>	–0,28	–0,316	<i>a9</i>	0,059	0,023	<i>s9</i>	0,163	0,013	<i>F12</i>	–0,15	–0,3	<i>b12</i>
<i>A7</i>	0,04	0,025	<i>E7</i>	0	–0,015	<i>h7</i>	0,3	0,15	<i>B12</i>	0,19	0,04	<i>D12</i>
<i>A8</i>	0,195	0,17	<i>u6</i>	0	–0,025	<i>h6</i>	0	–0,063	<i>h8</i>	0,155	0,092	<i>s8</i>
<i>A9</i>	0,33	0,27	<i>A11</i>	0,03	–0,03	<i>js11</i>	0,1	0,06	<i>C10</i>	0,067	0,028	~x10
<i>A10</i>	0,295	0,28	<i>A7</i>	–0,04	–0,055	<i>d7</i>	0,061	0,025	<i>E9</i>	0,042	0,006	<i>m9</i>

Критерий (20) определяет разброс единиц допуска вне зависимости от размеров элементов, что позволяет их сравнивать. Так, по данным табл. 1 и 2 этот критерий для классического расчета методом полной взаимозаменяемости равен 4,14, классического расчета методом неполной

взаимозаменяемости – 13,26, метода генетического поиска для полной взаимозаменяемости при всех возможных отклонениях из стандарта – 30,56, метода генетического поиска для неполной взаимозаменяемости при всех возможных отклонениях из стандарта – 55, 88. В целом критерий (20) показывает, что метод неполной взаимозаменяемости дает более широкий диапазон допусков, чем метод полной взаимозаменяемости. Следовательно, в этом смысле он лучше. Метод генетического поиска дает лучшие результаты по критерию (20), чем классический метод расчета. Если сравнить расчеты методом неполной взаимозаменяемости, то получится, что генетический поиск дает процент брака 0,27, а классический метод расчета – процент брака 0,693 при одинаковом прогнозируемом проценте брака 0,27. При генетическом поиске из четырех расчетов только в одном пришлось использовать размер $A9$ (выделено жирным в табл. 2) для компенсации погрешности расчета, но при этом результаты были близки к допуску $x10$.

Сравнительный анализ результатов расчетов по табл. 1 и 2 для генетического поиска показывает, что для 80 % размеров были подобраны более широкие допуски. Это соответствует основным положениям использования метода неполной взаимозаменяемости. Исключениями являются размеры $A3$ и $A9$ в связи с тем, что для ГА не были заданы нужные ограничения, т. е. система ограничений сформирована некорректно относительно условий производства и эксплуатации узла. Для того чтобы обеспечить гарантированное расширение допусков размеров при расчете методом неполной взаимозаменяемости, необходимо задать нижние границы опорных множеств допусков, где качество должен быть больше на единицу по сравнению с качеством размера в табл. 2 при расчете методом полной взаимозаменяемости. С учетом этих поправок в ограничениях были проведены расчеты и получены данные, сведенные в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов с помощью генетического поиска для нижних границ качественностей

Размер	Взаимозаменяемость						Квалитет		Расширение допуска в качествах по табл. 2
	неполная (все)			неполная (предпочт.)			минимум	максимум	
	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>	<i>ES</i>	<i>EI</i>	<i>T</i>			
AD	0,25	0	–	0,25	0	–	–	–	–
$A1$	0,138	0,054	$x10$	0	–0,084	$h10$	7	16	+4
$A2$	–0,007	–0,059	$g9$	0	–0,052	$h9$	8	16	+2
$A3$	0	–0,062	$h9$	–0,05	–0,112	$e9$	9	16	+1
$A4$	–0,04	–0,124	$e10$	0,106	0,022	$p10$	7	16	+4
$A5$	0,138	0,054	$x10$	0	–0,084	$h10$	7	16	+4
$A6$	–0,013	–0,071	$f10$	0	–0,058	$h10$	10	16	+1
$A7$	0,073	0,015	$p10$	0,138	0,08	$c10$	8	16	+3
$A8$	0,123	0,023	$n9$	–0,085	–0,185	$e9$	7	16	+3
$A9$	0,12	0,02	$D12$	0	–0,1	$h12$	12	16	+1
$A10$	0,103	0,013	$F11$	0	–0,09	$h11$	8	16	+4

Заключение. Метод генетического поиска, используемый для расчета размерных цепей, дает результаты, не худшие, чем классические методы расчета, а по некоторым критериям – лучшие. В частности, при решении задачи методом неполной взаимозаменяемости расчетный процент брака соответствует прогнозируемому проценту, тогда как при классических расчетах будет погрешность. Предлагаемый метод позволяет подбирать допуски и отклонения с учетом большего количества условий функционирования узла за счет более широкого диапазона назначаемых допусков и отклонений. Эффективность генетического поиска зависит от «информированности» метода об условиях поиска, что выражается в виде технических ограничений. Таким образом, чем корректнее сформирована система ограничений с точки зрения эффективности эксплуатации и производства узла, тем лучше полученное решение, что отражено в табл. 2 и 3.

Использование ИНС при формировании математической модели метода позволяет типизировать решения для различных подходов к проектному расчету размерных цепей. В этом случае генетический алгоритм работает с готовой нейронной сетью и поиск решения не зависит от типа расчета. Структура ИНС для разных расчетов неизменна, что дает возможность использовать типовые решения. Таким образом, меняя параметры нейронной сети, ее настраивают на разные расчеты. Данный подход позволяет широко применять принципы объектно-ориентированного проектирования при разработке САПР, что, в свою очередь, повышает степень использования повторяемости кода, снижая трудоемкость проектирования программных модулей.

Список использованных источников

1. Палей, М. А. Допуски и посадки : справочник : в 2 ч. / М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. – Изд. 8-е, перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2001. – Ч. 2. – 608 с.
2. АСКОН. Приложение. Размерные цепи. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-razmernye-cepti.pdf. – Дата доступа: 13.02.2018.
3. Inventor 2016. Справка: механический калькулятор допуска [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2016/RUS/?guid=GUID-A447C0F3-17E4-4A49-9D7F-4F6329ACE7B9>. – Дата доступа: 13.02.2018.
4. CETOL 6 Сигма: осознанная целесообразность точности [Электронный ресурс] // Умное производство. – 2017. – № 40. – Режим доступа: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17 &art_id_1=212&group_id_4=68. – Дата доступа: 13.02.2018.
5. Абзалов, А. Р. Размерный анализ на основе параметрических моделей с использованием электронных таблиц [Электронный ресурс] / А. Р. Абзалов, В. Н. Иванова, А. Е. Хабаров // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 12. – Режим доступа: <https://www.top-technologies.ru/pdf/2016/12-1/36467.pdf>. – Дата доступа: 13.02.2018.
6. Дин, Э. NX 8.5 от Siemens PLM Software [Электронный ресурс] / Э. Дин // САПР и графика. – 2013. – № 3. – С. 40–44. – Режим доступа: <http://sapr.ru/article/23687>. – Дата доступа: 13.02.2018.
7. Анкин, А. В. Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи [Электронный ресурс] / А. В. Анкин, Д. Л. Кузьминский // Известия МГТУ. – 2011. – № 2. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-dlya-rascheta-prostranstvennoy-razmernoj-tsepi>. – Дата доступа: 13.02.2018.
8. Ивахненко, А. А. Синтез допусков показателей качества при проектировании и эксплуатации продукции машиностроения [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.23 / А. А. Ивахненко. – Курск, 2015. – 163 с. – Режим доступа: <https://swsu.ru/structura/aup/upiakvk/ods/dissertation-ivahnenko-aa.pdf>. – Дата доступа: 26.07.2018.
9. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков : Телетех, 2004. – 369 с.
10. Анухин, В. И. Допуски и посадки. Выбор и расчет, указание на чертежах : учеб. пособие / В. И. Анухин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. – 219 с.
11. Фролов, В. В. Практические аспекты использования параллельных вычислений в генетическом алгоритме / В. В. Фролов // Доклады БГУИР. – 2018. – № 5(115). – С. 24–30.

References

1. Palej M. A., Romanov A. B., Braginskij V. A. Dopuski i posadki. Chast' 2. *Tolerances and Landing*. Part 2. Saint Petersburg, Politehnika, 2001, 608 p. (in Russian).
2. ASKON. Prilozhenie. Razmernye cepi. Rukovodstvo pol'zovatelja [ASKON. Application. Dimensional chains. User's manual] (in Russian). Available at: https://kompas.ru/source/info_materials/user-manuals/rukovodstvo-polzovatelya-razmernye-cepti.pdf (accessed 13.02.2018).
3. Inventor 2016. Spravka: Mehanicheskij kal'kuljator dopuska [Inventor 2016. Help: Mechanical Tolerance Calculator] (in Russian). Available at: <http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2016/RUS/?guid=GUID-A447C0F3-17E4-4A49-9D7F-4F6329ACE7B9> (accessed 13.02.2018).
4. CETOL 6 Sigma: osoznannaja celesoobraznost' tochnosti [CETOL 6 sigma: the conscious purpose of precision]. *Umnoe proizvodstvo [Smart Production]*, 2017, no. 40 (in Russian). Available at: http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17 &art_id_1=212&group_id_4=68 (accessed 13.02.2018).

5. Abzalov A. R., Ivanova V. N., Habarov A. E. Razmernyj analiz na osnove parametricheskikh modelej s ispol'zovaniem jelektronnyh tablic [Dimensional analysis based on parametric models using spreadsheets]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii [Modern High Technologies]*, 2016, no. 12 (in Russian). Available at: <https://www.top-technologies.ru/pdf/2016/12-1/36467.pdf> (accessed 13.02.2018).
6. Dean A. NX 8.5 ot Siemens PLM Software [NX 8.5 from Siemens PLM software]. *SAPR i grafika [CAD Systems]*, 2013, no. 3, pp. 40–44 (in Russian). Available at: <http://sapr.ru/article/23687> (accessed 13.02.2018).
7. Ankin, A. V., Kuz'minskij D. L. Razrabotka programmnoho obespechenija dlja rascheta prostranstvennoj razmernoj cepi [Development of software for the calculation of spatial dimensional chain]. *Izvestija MGTU [News of Moscow State Technical University]*, 2011, no. 2 (in Russian). Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-programmnogo-obespecheniya-dlya-rascheta-prostranstvennoy-razmernoy-tsepi> (accessed 13.02.2018).
8. Ivahnenko A. A. Sintez dopuskov pokazatelej kachestva pri proektirovanii i jekspluatacii produkcii mashinostroenija : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.02.23 [*Synthesis of Tolerances of Quality Indicators in the Design and Operation of Engineering Products: Cand. sci. diss. (Eng.)*]. Kursk, 2015, 163 p. (in Russian). Available at: <https://swsu.ru/structura/aup/upiakvk/ods/dissertation-ivahnenko-aa.pdf> (accessed 26.07.2018).
9. Bodjanskij, E. V., Rudenko O. G. Iskusstvennye nejronnye seti: arhitektury, obuchenie, primenenija. *Artificial Neural Networks: Architecture, Training, Applications*. Kharkov, Teleteh, 2004, 369 p. (in Russian).
10. Anuhin, V. I. Dopuski i posadki. Vybor i raschet, ukazanie na chertezhah. *Tolerances and Landings. Selection and Calculation, Indication on the Drawings*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University, 2001, 219 p. (in Russian).
11. Frolov V. V. Practical aspects of using of parallel computing in genetic algorithm [Practical aspects of using parallel computing in a genetic algorithm]. *Doklady BGUIR [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2018, no. 5(115), pp. 24–30 (in Russian).

Информация об авторе

Фролов Вячеслав Викторович, доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина.
E-mail: vvicfrol@rambler.ru

Information about the author

Vyacheslav V. Frolov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine.
E-mail: vvicfrol@rambler.ru