

УДК 681.3

А.А. ПОДРОЖНЯК, Ю.Б. ПРИБЫЛЕВ, М.Ю. ЯКОВЛЕВ

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина***ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПЕРЕДАЧИ ИХ РАЗМЕРОВ ПО КРИТЕРИЮ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

В статье сформулирована задача оптимизации систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров по критерию метрологической надежности. Предложен подход к ее решению на основе применения генетических алгоритмов.

**критерий, метрологическая надежность, средства измерительной техники, система воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров, оптимизация, генетические алгоритмы**

**Введение**

**Постановка проблемы.** Повышение эффективности метрологической службы тесно связано с совершенствованием поверочной деятельности. Этот факт определяет актуальность задачи оптимизации систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров.

**Анализ публикаций.** За последние годы вопросам оптимизации систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров посвящено ряд работ [1 – 3]. Их авторы предлагают в качестве критериев оптимизации использовать следующие критерии: минимум условно-годовых затрат на обеспечение единообразия средств измерительной техники (СИТ), минимум затрат на транспортировку СИТ, максимум интегрального показателя качества системы воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров и т.д. Однако перечисленные критерии не учитывают взаимосвязи характеристик систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров с метрологической надежностью СИТ.

**Цель статьи.** Сформулировать в общем виде задачу оптимизации систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров по критерию метрологической надежности и предложить подход к

ее решению на основе применения методов эволюционного моделирования – генетических алгоритмов (ГА).

**Основная часть**

Достижение единообразия СИТ является целью и основным содержанием метрологической деятельности. Для этого привлекаются специальные технические, нормативные и организационные средства [4]. Техническими средствами являются первичные, вторичные и рабочие эталоны, а также вспомогательные средства, используемые при проведении поверок. К нормативным средствам относятся нормативно-техническая документация, которая определяет порядок передачи размера единицы физической величины, устанавливает требования к методикам поверки, регламентирует порядок и правила поверочной деятельности и т. д. Метрологическая служба Украины составляет организационные средства достижения единообразия СИТ. Технические и нормативные средства достижения единообразия СИТ одной физической величины представляют собой упорядоченные системы СИТ и документов, предназначенных для достижения общей цели. На практике их принято называть системами воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров [4]. Целью работ по созданию, совершен-

створенню і підтриманню в робочому стані систем виробництва одиниць фізических величин і передачі їх розмірів від еталонів к СИТ являється забезпечення метрологічної надійності СИТ на етапі експлуатації [1]. Тому при аналізі можливих способів підвищення метрологічної надійності СИТ особливе місце займають методи оптимізації систем виробництва одиниць фізических величин і передачі їх розмірів.

В статті розглядається задача оптимізації систем виробництва одиниць фізических величин і передачі їх розмірів. Структурно вона може бути представлена цільовою функцією, обмеженнями метрологічного, технічного, організаційного і економічного характеру, а також сукупністю: рівнянь, що описують зростання похибки СИТ при передачі розміру одиниці фізическої величини в системі; рівнянь для визначення необхідної кількості вихідних еталонів в залежності від кількості СИТ, їх розміщення в країні, дислокації поверочних органів і міжповерочних інтервалів СИТ.

В якості критерію оптимізації приймемо коефіцієнт метрологічної надійності СИТ даного виду вимірювань при  $n$ -м варіанті побудови системи виробництва одиниць фізических величин і передачі їх розмірів:

$$k_{min} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{mg}} k_{mii} \frac{N_{mi} H_i}{S_i^2}}{\sum_{i=1}^{N_{mg}} \frac{N_{mi} H_i}{S_i^2}}, \quad (1)$$

де  $k_{mii}$  – коефіцієнт метрологічної надійності СИТ  $i$ -го типу;  $N_{mi}$  – кількість СИТ  $i$ -го типу;  $H_i$  – кількість вимірювань в одиницю часу СИТ  $i$ -го типу;  $N_{mg}$  – кількість типів СИТ даного виду вимірювань;  $S_i$  – межа допустимої основної похибки  $\Delta_i$  або довірлива основна похибка  $\delta_i$  СИТ  $i$ -го типу.

Оптимальне значення коефіцієнта метроло-

гічної надійності системи визначається з умови максимуму коефіцієнта метрологічної надійності СИТ даного виду для  $n$ -го варіанту побудови системи

$$k_{mi} = \max_n \{k_{min}\}, \quad (2)$$

при виконанні наступних умов в кожному поверочному органі ( $m$ ) і кожному розряді вихідних еталонів ( $g$ ):

$$V_{mg} \leq \tilde{V}_{mg}, \quad (3)$$

$$K_{mg} \geq \tilde{K}_{mg}, \quad (4)$$

$$C_{mg} \leq \tilde{C}_{mg}. \quad (5)$$

В нерівностях (3 – 5) зліва знаходяться забезпечувані системою вектори об'ємів перевірок  $V_{mg}$ , показателів якості перевірки  $K_{mg}$  і витрат на функціонування системи  $C_{mg}$ , а справа – вектори їх гранично допустимих значень, обумовлених метрологічними вимогами, технічними і економічними обмеженнями.

Принципальною є те, що  $k_{mi}$  визначається тільки по парку СИТ. З цього випливає, що позитивний ефект від удосконалення системи виробництва одиниць фізических величин і передачі їх розміру визначається підвищенням якості вимірювань, а показателем ефективності цієї системи повинен бути функціонал, побудований на множині СИТ, застосовуваних в країні, регіоні або підприємстві.

З співвідношення (1) видно, що коефіцієнт метрологічної надійності  $k_{min}$  є функцією коефіцієнта метрологічної надійності  $k_{mii}$  СИТ  $i$ -го типу. В свою чергу величина коефіцієнта метрологічної надійності  $k_{mii}$  СИТ  $i$ -го типу залежить від міжповерочних інтервалів і показателів якості перевірок, визначених структурою поверочної схеми, співвідношеннями похибок еталонів і СИТ, а також контрольними

допусками. Поэтому приведенные выше соотношения оптимизационной задачи необходимо дополнить уравнениями, устанавливающими зависимость  $k_{mi}$  от параметров принятой системы воспроизведения единицы и передачи ее размера [1]:

$$\delta_{t+1} = \varepsilon * \left[ \bigcup_{f=0}^{t+1} \xi_f \right] * \left[ \bigcup_{f=0}^t k_{cm}(N_f - 1, P_f) \sigma_{t+1} \right], \quad (6)$$

где  $\delta_{t+1}$  – основная погрешность СИТ, находящегося на  $(t+1)$ -й ступени поверочной схемы;  $\varepsilon$  – не исключенная систематическая погрешность воспроизведения единицы физической величины первичного эталона;  $\xi_f$  – нестабильность СИТ;  $N_f$  – число независимых измерений при поверке;  $k_{cm}(N_f - 1, P_f)$  – коэффициент распределения Стьюдента при числе степеней свободы  $(N_f - 1)$  и доверительной вероятности  $P_f$ ;  $\sigma_{t+1}$  – СКО случайной составляющей погрешности измерений при поверке СИТ, находящегося на  $(t+1)$ -ой ступени поверочной схемы [1]:

$$\sigma_{t+1} = \sqrt{\frac{\sigma_f^2 + \sigma_{f+1}^2 + \sigma_{mf}^2}{N_f}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_f$  – СКО случайной погрешности эталона;  $\sigma_{f+1}$  – СКО случайной погрешности поверяемого СИТ;  $\sigma_{mf}$  – СКО случайной погрешности метода измерений. В формуле (6) символом \* обозначена операция стохастического суммирования.

Анализ соотношений (1 – 7) показывает, что целевая функция в сформулированной оптимизационной задаче зависит от большого количества переменных различной размерности. Для некоторых из этих переменных зависимость носит явно выраженный нелинейный характер. Кроме того, накладывается ряд ограничений, существенно влияющих на результирующее значение целевой функции. В этом случае целевая функция из выражения (1) будет иметь множество максимумов и минимумов (т.е.

будет иметь мультимодальный характер). Очевидно, что из-за мультимодальности функции (1) ее решение градиентными методами оказывается невозможным. На практике для решения аналогичных задач широко используется метод полного перебора, однако предварительные расчеты показали, что его использование приведет к существенным временным и машинным затратам. Поэтому для решения задачи оптимизации многопараметрической мультимодальной функции (1) предлагается использовать ГА. Эффективность применения ГА заключается в их способности манипулировать многими параметрами и использовать явление неявного параллелизма при вычислениях, позволяющее сократить временные затраты на поиск квазиоптимального решения [5]. Область применения ГА, как правило, – это задачи с большим пространством поиска решений и малым количеством (или отсутствием) эвристической информации. Их основным преимуществом является то, что они применяются в сложных задачах, для решения которых специальных методов не существует. ГА позволяют находить квазиоптимальное решение в многомерном мультимодальном функциональном пространстве за приемлемое время [5, 6].

Выделим следующие основные этапы решения поставленной задачи оптимизации системы воспроизведения единиц и передачи их размеров с помощью ГА: кодирование входящих параметров и формирование хромосомы, как варианта решения оптимизационной задачи; инициализация популяции; расчет значения целевой функции и присвоение ее значения всем особям популяции; селекция особей в популяции; применение генетических операторов (кроссовера, инверсии и мутации) с целью образования следующей популяции; останов ГА при нахождении лучшего (оптимального) значения целевой функции, или его повторная инициализация при отсутствии удовлетворяющего значения целевой функции после заданного количества эпох работы ГА.

Поясним перечисленные этапы решения сформулированной оптимизационной задачи. При кодировании входных величин предлагается проводить их нормализацию согласно выражению [6]:

$$x_k^{норм} = \frac{x_k - x_k^{\min}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}, \quad (8)$$

где  $x_k$  –  $k$ -й входной параметр;  $x_k^{\min}$  и  $x_k^{\max}$  – его минимальное и максимальное значения, соответственно.

Кодирование осуществляется с помощью кода Грея [6], имеющего явные преимущества по сравнению с двоично-десятичным кодом, который при некотором стечении обстоятельств порождает своеобразные тупики для поискового процесса. В случае использования кода Грея поиск решения ведется в  $\gamma$ -мерном гиперкубе, заданном множеством  $\{1,0\}$  [6]:

$$\gamma = \sum_{k=1}^v d_k, \quad (9)$$

где  $v$  – количество кодируемых параметров (генов) в хромосоме;  $d_k$  – количество разрядов, необходимых для кодирования  $k$ -го параметра.

При инициализации популяции предлагается генерировать по равномерному закону значения 1 и 0 в каждом разряде каждой из хромосом, являющейся вариантом решения оптимизационной задачи. Для обеспечения разумного компромисса между величиной поискового пространства и скоростью его исследования предлагается размер популяции сократить вдвое относительно первоначально иницилируемой популяции.

В качестве целевой функции используется выбранный показатель метрологической надежности системы воспроизведения единиц и передачи их размеров (обобщенный коэффициент метрологической исправности СИТ одного вида). Расчет его производится для каждой особи популяции, которые представляют собой варианты реализации системы воспроизведения единиц и передачи их размеров. Кодируемыми параметрами для каждой особи яв-

ляются входные параметры, необходимые для вычисления значения выбранной целевой функции. Количество разрядов, отводимых для каждого параметра, определяется исходя из чувствительности выбранной целевой функции к данному параметру.

Селекция особей в популяции производится на основании пропорционального отбора в соответствии с вероятностью селекции, определяемой выражением [6]:

$$P_c(k) = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^{N_{оп}} f_k}, \quad (11)$$

где  $f_i$  – значение целевой функции для  $i$ -й особи популяции;  $n$  – количество особей в популяции. Чем выше приспособленность особи, тем больше вероятность того, что она будет участвовать в формировании следующего поколения. Кроме того, на этом этапе предлагается использовать принцип элитизма [5], суть которого заключается в переносе лучшей особи с предыдущего поколения в последующее без изменений.

К избранным особям применяются генетические операторы (рис. 1), которые обеспечивают не полный перебор всех точек пространства поиска,

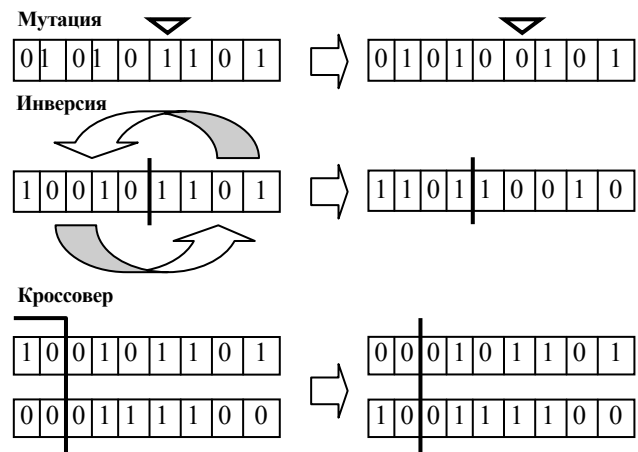


Рис. 1. Пример применения основных генетических операторов для  $k_{mul}$

а обработку значительного числа гиперплоскостей поискового пространства, отличающихся высокой приспособленностью.

На рис. 1 показана реализация генетических операторов для одного из параметров целевой функции (например, для коэффициента метрологической исправности СИТ  $i$ -го типа  $k_{mii}$ ), представленного в виде 9-ти битного кода Грея. При этом оператор мутации обеспечивает изменение значения выбранного разряда в хромосоме на противоположное, что вызывает перемещение поисковой точки по одному из ребер гиперкуба и позволяет осуществлять поиск решения на значительном расстоянии от существующих реализаций системы. Оператор инверсии генерирует нарушение порядка следования цифр в хромосоме, что вызывает отражение точки по диагонали в плоскости одной из соприкасающихся граней; кроссовер генерирует потомка, в хромосоме которого присутствуют два фрагмента, ранее принадлежавшие двум различным родительским особям, и находящегося в одной из вершин на пересечении граней, соприкасающихся с порождающими вершинами.

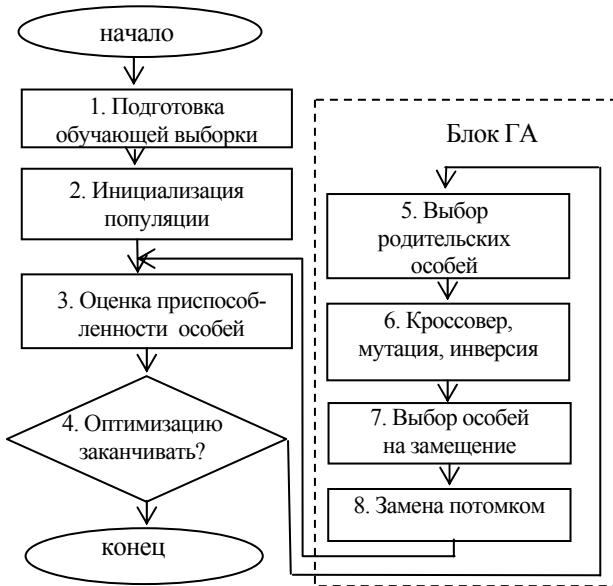


Рис. 2. Схема алгоритма оптимизации системы воспроизведения единиц и передачи их размеров с использованием ГА

Данный алгоритм может быть реализован в среде моделирования MATLAB с использованием подпрограмм по эволюционному моделированию, входящих в комплект поставки пакета, начиная с версии 7.0 [7].

## Выводы

Таким образом, в статье сформулирована задача оптимизации системы воспроизведения единиц и передачи их размеров по критерию метрологической надежности, выделены основные этапы ее решения и предложен алгоритм оптимизации системы воспроизведения единиц и передачи их размеров с использованием ГА. **Дальнейшие исследования** планируются направить на разработку математической модели систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров с применением ГА.

## Литература

1. Кудрявцев О.А., Семенов Л.А., Фридман А.Э. Математическое моделирование систем обеспечения единства измерений (состояние и перспективы) // Физические проблемы точных измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 8-15.
2. МИ 2147-91. Рекомендация. ГСИ. Воспроизведение единиц и передача их размеров. Основные положения. – СПб.: НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", 1991. – 11 с.
3. Каминский В.Ю. Методология синтеза систем воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров // Измерительная техника. – 1992. – № 11. – С. 6-7.
4. Васильев А.И., Зеленцов Б.П., Цибина А.А. О некоторых вопросах совершенствования системы обеспечения единства измерений // Измерительная техника. – 1976. – № 4. – С. 8-10.
5. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search. Optimization and Machine Learning. – Reading, MA: Addison – Wesley, 1989. – 412 p.
6. Полярус О.В., Карпенко О.В., Сімонов С.І. Генетичні алгоритми. – Х.: ХВУ, 2003. – 104 с.
7. The Mathworks [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/>.

Поступила в редакцию 10.08.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.В. Худов, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков.