



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012130970/07, 20.07.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
20.07.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.07.2012

(45) Опубликовано: 10.11.2013 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2068196 C1, 20.10.1996. RU 2014724 C1,  
15.06.1994. RU 2044401 C1, 20.09.1995. RU  
2339988 C1, 27.11.2008. US 7990112 B2,  
02.08.2011. WO 199001926 A1, 20.01.1994.

Адрес для переписки:

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, МГТУ им.  
Н.Э. Баумана, Центр защиты  
интеллектуальной собственности, Е.С.  
Халатовой

(72) Автор(ы):

Бумагин Алексей Валериевич (RU),  
Гондарь Алексей Васильевич (RU),  
Борзов Андрей Борисович (RU),  
Лихоеденко Константин Павлович (RU),  
Цыганков Виктор Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

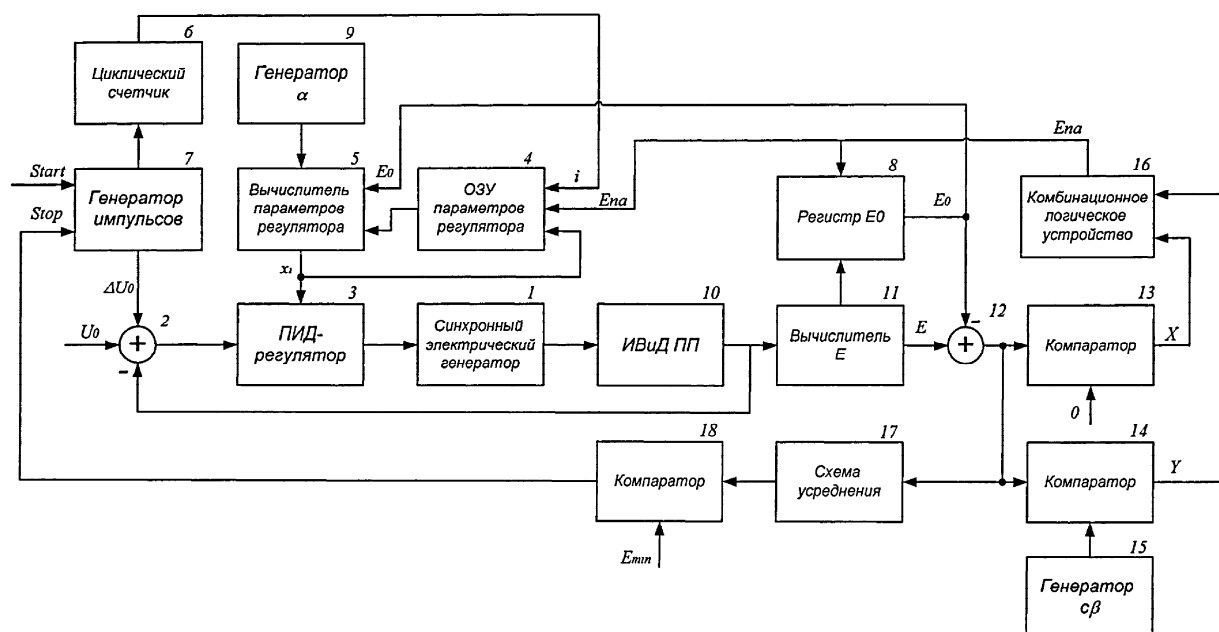
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ  
им. Н.Э. Баумана) (RU)

## (54) СПОСОБ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электротехники и может быть использовано для управления синхронными генераторами на предприятиях, вырабатывающих электрическую энергию. Технический результат - обеспечение автоматической оптимизации параметров регулятора возбуждения синхронного генератора на этапе ввода оборудования в эксплуатацию без дестабилизирующего воздействия на энергосистему и без нарушения ее устойчивости. Для этого устанавливают параметры регулятора возбуждением по отклонению от уставки одного из его выходных сигналов, начальное значение критерия оптимизации параметров регулятора  $E_0$ , новое значение оптимизируемого параметра регулятора в соответствии с формулой, изменяют уставку регулируемого выходного сигнала на постоянную величину на

фиксированное время, измеряют величину и длительность переходного процесса выходного сигнала генератора по указанным изменениям уставки, вычисляют новое значение критерия оптимизации  $E$  в соответствии с формулой и устанавливают значения  $E_0$  и параметра так, что при выполнении условия  $E < E_0$  или при одновременном выполнении условия:  $E \geq E_0$  и  $(E - E_0)/c > \beta_i$  устанавливают  $E_0 = E$ , а параметр не изменяют. Иначе возвращают параметр к исходному значению. Повторяют указанные операции для других оптимизируемых параметров регулирования до уменьшения средней скорости изменения величины  $E_0$  до заранее установленного значения, где  $\beta_i$  - случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[0,1]$ ,  $c$  - положительная постоянная величина, определяющая скорость оптимизации параметров регулятора. 1 ил.





Область техники

Изобретение относится к классу способов управления электрическими генераторами с целью получения требуемого значения выходных параметров, в частности, управления возбуждением генератора с целью ослабления вредных влияний перегрузок или переходных процессов, например при внезапном подключении, снятии или изменении нагрузки, и может быть использовано в при создании оборудования для управления синхронными генераторами на предприятиях, вырабатывающих электрическую энергию.

Уровень техники

Стабильность и эффективность работы генерирующего оборудования энерговырабатывающих предприятий, а также качество вырабатываемой электрической энергии в значительной степени определяются точностью настройки параметров регуляторов возбуждения синхронных электрических генераторов (коэффициентов усиления и постоянных времени), определяющих величину и длительность электромеханических переходных процессов, возникающих в сопряженной с генератором энергосистеме.

В существующих системах управления возбуждением оптимизация параметров регулятора возбуждения на этапе ввода в эксплуатацию и при повторных пусках производится путем ручной установки, итеративно, исходя из накопленного опыта, интуиции персонала и визуального анализа осциллограмм переходных процессов. Для оптимизации параметров регулирования требуется большое количество итераций, и существенные временные затраты.

Предлагаемое изобретение направлено на решение задачи автоматизации и сокращения времени оптимизации параметров регулятора возбуждения синхронного генератора на этапе ввода оборудования в эксплуатацию.

Известен способ адаптивного регулирования возбуждения синхронного генератора [1], заключающийся в измерении параметра режима, определении отклонения параметра режима и его производной, определении низкочастотной составляющей параметра режима в интервале 0,3-1,3 Гц, вычислении квадрата амплитуды низкочастотной составляющей параметра режима и определении ее средней величины, формировании коэффициентов усиления по отклонению и производной параметра режима, умножении коэффициента усиления по отклонению параметра режима на его отклонение для получения первого параметра регулирования возбуждения, умножении коэффициента усиления по производной параметра режима на его производную для получения второго параметра регулирования возбуждения, суммировании полученных величин, регулировании возбуждения синхронного генератора в зависимости от полученной суммы, определении высокочастотных составляющих соответственно первого и второго параметров регулирования возбуждения в интервале 1,3-3 Гц, вычислении квадратов амплитуд указанных величин и определении их среднего значения, сравнении среднего значения низкочастотной составляющей параметра режима соответственно со средними значениями высокочастотных составляющих первого и второго параметров регулирования возбуждения, интегрировании каждого результата сравнения, и использовании полученных величин для корректировки коэффициентов усиления по отклонению параметра режима и его производной.

Недостатки указанного способа заключаются в том, что в нем не ставится и не решается задача автоматической настройки постоянных времени регулирования по режимным параметрам синхронного генератора; в относительно низкой точности

определения коэффициентов усиления регуляторов по режимным параметрам за счет того, что при этом производится обработка только граничных частот полосы спектра сигналов электрического генератора.

Указанных недостатков лишен выбранный в качестве прототипа способ, реализованный в самонастраивающейся системе управления [2], содержащей пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) - регулятор, соединенный через сумматор с объектом управления, выход которого подключен к одному из входов заграждающего фильтра (включенного в цепь обратной связи системы), выход которого через устройство сравнения подключен к первому входу регулятора и к одному из входов измерителя амплитуды и фазы, первый выход которого соединен со входом блока фазовой подстройки частоты, выход блока фазовой подстройки частоты соединен соответственно со входом блока вычисления коэффициентов заграждающего фильтра, выход которого подключен к второму входу заграждающего фильтра, со входом вычислительного блока и со входом генератора пробных гармонических колебаний, выход которого соединен со вторым входом измерителя амплитуды и фазы, второй выход которого соединен с первым входом вычислительного блока, выход которого подключен ко второму входу регулятора.

Способ, реализованный в прототипе, заключается в том, что устанавливают параметры ПИД-регулятора (коэффициент усиления, постоянные времени интегрирования и дифференцирования), при помощи которого управляют возбуждением электрического генератора по отклонению от уставки одного из его выходных сигналов, который в главном контуре управления дополнительно фильтруют заграждающим фильтром, а к сигналу управления возбуждением генератора дополнительно добавляют пробный гармонический сигнал, измеряют установившиеся значения амплитуды и фазы гармонической составляющей выходного сигнала генератора на частоте пробного сигнала, которую устанавливают таким образом, чтобы фазовый сдвиг между пробным гармоническим сигналом и выходным сигналом генератора был равен  $\Pi$ , и на которую настраивают перестраиваемый заграждающий фильтр, по измеренным установившимся значениям амплитуды и фазы гармонической составляющей выходного сигнала генератора вычисляют и устанавливают параметры ПИД-регулятора.

Основной недостаток прототипа заключается в том, что в последнем используется прямой метод адаптации параметров регулятора за счет добавления непосредственно на вход управляемого объекта пробного гармонического сигнала, установление частоты которого на уровне частоты критических колебаний объекта сопровождается переходным процессом, выводящим систему за пределы устойчивости регулирования.

#### Сущность изобретения

Технической задачей предлагаемого изобретения является сокращение величины и длительности электромеханических переходных процессов, действующих в электрическом генераторе за счет оптимизации параметров регулятора возбуждения на этапе ввода в эксплуатацию, а также автоматизация и сокращение времени указанного процесса.

Для реализации поставленной задачи в способе настройки параметров регулятора возбуждения синхронного электрического генератора, заключающемся в том, что устанавливают параметры регулятора, которым управляют возбуждением электрического генератора по отклонению от уставки одного из его выходных сигналов, устанавливают начальное значение критерия оптимизации параметров регулятора  $E_0$ , устанавливают новое значение  $i$ -го оптимизируемого параметра

регулятора, вычисляемое по правилу  $x_i = x_{0i} + 2E_0 D_i(\alpha - 0,5)/c$ , скачкообразно изменяют уставку регулируемого выходного сигнала на постоянную величину на фиксированное время, измеряют величину и длительность переходного процесса регулируемого выходного сигнала генератора, вызванного указанным изменением 5 уставки, вычисляют новое значение критерия оптимизации  $E$  как взвешенную сумму измеренных величин, сравнивают значения  $E$  и  $E_0$  и устанавливают значения  $E_0$  и  $x_i$  таким образом, что если выполняется условие  $E < E_0$  или одновременно выполняются условия:  $E \geq E_0$  и  $(E - E_0)/c \geq \beta$ , то устанавливают  $E_0 = E$  и  $x_{0i} = x_i$ , а параметр  $x_i$  не изменяют, 10 в противном случае возвращают параметр  $x_i$  к исходному значению  $x_{0i}$ , циклически повторяют указанные операции для других оптимизируемых параметров регулирования вплоть до уменьшения средней скорости изменения величины  $E_0$  до заранее установленного значения,  $x_{0i}$ ,  $D_i$  - соответственно исходное значение и диапазон изменения параметра  $x_i$ ;  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  - случайные величины, равномерно 15 распределенные на интервале  $[0,1]$ ,  $c$  - положительная постоянная величина, определяющая скорость оптимизации.

Эта совокупность признаков позволяет решать задачу изобретения.

Изобретение поясняется чертежом, иллюстрируется описываемый ниже пример 20 осуществления предлагаемого способа.

В основу предлагаемого способа положен подход к адаптации параметров регулятора с использованием импульсного пробного сигнала, основанный на стохастической оптимизации указанных параметров по заданному критерию качества 25 регулирования. Преимуществом указанного подхода является инвариантность к закону функционирования и количеству оптимизируемых параметров регулятора, а также гарантированная сходимость к оптимальному решению. Предлагаемый способ может применяться как к одному, так и ко всем традиционно используемым регуляторам сигналов (системных параметров) в составе устройства автоматической 30 регулировки возбуждения синхронного генератора (по отклонению и производной напряжения, по производной тока обмотки возбуждения, по отклонению и производной скольжения). Наиболее часто в качестве для выработки сигналов управления возбуждением используются пропорционально-интегральный (ПИ) и ПИД-регуляторы. 35

В отличие от способа-прототипа пробный сигнал подается не прямо на вход управляемого объекта, в роли которого выступает синхронный электрический генератор, а косвенно - за счет изменения уставки регулирования  $U_0$ . Кроме того, 40 указанный сигнал является импульсным, с малой амплитудой. Указанные способ подачи и вид пробного сигнала не оказывают сильного дестабилизирующего воздействия на энергосистему и не приводит к нарушению ее устойчивости.

Способ может быть осуществлен, например, следующим образом.

Устройство, являющееся примером реализации предлагаемого способа настройки 45 параметров регулятора возбуждения синхронного электрического генератора включает следующие элементы (см. чертеж): синхронный электрический генератор 1, сумматор-вычитатель 2, ПИД-регулятор 3 с изменяемыми параметрами, оперативно запоминающее устройство (ОЗУ) 4 параметров регулятора, вычислитель параметров регулятора 5, циклический счетчик 6, генератор 7 импульсов, регистр 8 критерия 50 оптимизации, первый генератор 9 случайной величины, измеритель 10 величины и длительности переходного процесса (ИВиДПП), вычислитель 11 критерия оптимизации параметров регулятора, вычитатель 12, первый и второй компараторы 13 и 14 соответственно, второй генератор 15 случайной величины,

комбинационное логическое устройство 16, схема 17 скользящего усреднения, третий компаратор 18.

Устройство работает следующим образом.

Регулируемый выходной сигнал синхронного электрического генератора 1 поступает на сумматор-вычитатель 2, где сравнивается с уставкой  $U_0$ . Результат сравнения поступает на ПИД-регулятор 3 с изменяемыми параметрами, который формирует управляющий сигнал возбуждения генератора.

Начальные величины  $x_{0i}$  оптимизируемых параметров ПИД-регулятора 3 (коэффициент усиления, постоянные времени интегрирования и дифференцирования) определяются на основе наработанного опыта и записываются в ОЗУ 4, с выхода которого посредством вычислителя параметров регулятора 5 поступают на  $i$ -й параметрический вход ПИД-регулятора 3.

Циклический счетчик 6 с периодом счета, равным количеству оптимизируемых параметров регулятора, тактируемый сигналом с тактового выхода генератора 7 импульсов, служит для формирования адреса  $i$  для выборки значения  $x_{0i}$  из одноименного ОЗУ 10.

В вычислителе 5 по формуле  $x_i = x_{0i} + 2E_0 D_i (\alpha - 0,5) / c$  рассчитывается новое значение одного из оптимизируемых параметров  $x_i$  ПИД-регулятора 3, которое устанавливается в последнем. Величины:  $x_{0i}$  и  $E_0$  - предварительно загружаемые начальные значения величины соответственно  $i$ -го оптимизируемого параметра регулятора и критерия оптимизации поступают с выходов ОЗУ 4 и регистра 8 соответственно, причем  $E_0$  - заведомо максимальное число в используемой разрядной сетке,  $\alpha$  - случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[0,1]$  - с выхода первого генератора 9 случайной величины,  $D_i$  - диапазон изменения параметра  $x_i$ ,  $c$  - положительная постоянная, определяющая скорость оптимизации параметров регулятора.

Генератор 7 импульсов по сигналу запуска процесса оптимизации Start, осуществляет циклическую выработку пробного сигнала, который прибавляется к величине уставки  $U_0$  в сумматоре-вычитателе 2, в результате чего образуется переходной процесс выходного сигнала синхронного электрического генератора 1. Параметры, определяющие качество регулирования указанного сигнала, - величина и длительность переходного процесса - измеряются в одноименном блоке 10 и поступают в блок 11, где вычисляется значение критерия оптимизации параметров регулятора. Вычитатель 12 вычисляет значение  $E_0 = E - E_0$ , которое далее поступает в первый 13 и второй 14 компараторы, в которых сравнивается с величинами, подаваемыми на их опорные входы: соответственно с нулевой 0 и случайной  $\beta$ , вырабатываемой вторым генератором 15 случайной величины, где  $\beta$  - случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[0,1]$ . Величина  $E_0$  поступает с выхода регистра 8 критерия оптимизации. Каждый из компараторов вырабатывает логический сигнал (первый А) и (второй Y), равный лог. «1», если величина на сигнальном входе превосходит или равна величине на опорном, и лог. «0» - в противном случае.

Комбинационное логическое устройство 16 формирует сигнал  $E_{на}$  по правилу  $\overline{X} \mid Y \& X$ , где « $\mid$ » и « $\&$ » - операции лог. «ИЛИ» и «И» соответственно, при равенстве которого лог. «1» производится загрузка обновленных величин параметра регулятора  $x_i$  и критерия оптимизации  $E$ , снимаемых с выходов одноименных вычислителей 5 и 11 соответственно в ОЗУ 4 и регистр 8. Таким образом, принимаются

обновленные значения параметра регулятора  $x_{0i}=x_i$  и критерия оптимизации  $E_0=E$ . Если сигнал  $E_{0\alpha}$  равен лог. «0», то загрузка данных в регистры и обновление соответствующих параметров не производится и последние сохраняют предыдущие значения ( $x_{0i}$  и  $E_0$ ). В результате реализуется правило обновления значений  $E_0$  и  $x_i$  таким образом, что если выполняется условие  $E < E_0$  или одновременно выполняются условия:  $E \geq E_0$  и  $(E - E_0)/c > \beta$ , то устанавливают  $E_0=E$ , а параметр  $x_i$  не изменяют, в противном случае возвращают параметр  $x_i$  к исходному значению  $x_{0i}$ .

Далее повторяется следующий цикл оптимизации, начиная с выработки пробного сигнала генератором 7, но уже с обновленными значениями  $x_{0i}$  и  $E_0$ .

Величина  $E - E_0$  с выхода вычитателя 18 также подается на схему 17 скользящего усреднения, где вычисляется средняя скорость изменения величины  $E_0$ , равная

$$\frac{1}{T} \sum_k (E_0 - E)_k,$$

которая в третьем компараторе 18 сравнивается с заранее установленным значением, подаваемым на опорный вход  $k$  - номер итерации при оптимизации параметров. Тем самым формируется сигнал останова процесса оптимизации  $Stop$ , индицирующий достижение требуемой точности, который останавливает процесс выработки пробных импульсов генератором 7 и адресов  $i$  для выборки значений  $x_{0i}$  циклическим счетчиком 6; считается, что достигнуты значения коэффициентов регулятора, близкие к оптимальным, с заданной точностью.

Критерием оптимизации параметров регулятора может быть использована взвешенная сумма величины и длительности переходного процесса, вычисляемая по формуле  $E = k_t \tau + k_A A$ , где  $A$ ,  $\tau$  - соответственно измеренные величина и длительность переходного процесса;  $k_A$ ,  $k_t$  - весовые коэффициенты, определяющие степень значимости соответствующего параметра, однако совместно или вместо указанного критерия может быть использованы другие Парето-оптимальные критерии, например, энергия переходного процесса.

В качестве пробного сигнала возможно использование гауссовских, полигауссовских, сглаженных во временной области прямоугольных или других импульсов фиксированной величины и длительности, являющихся типичными и вызывающих основной спектр гармонических составляющих, возникающих при электромеханических переходных процессах в энергосистемах, и, в то же время, не вызывающих ударных воздействий на оборудование генератора, системы возбуждения и механических подсистемах управления генератором в результате быстрого изменения протекающих токов и перенапряжений в диодной или тиристорной системе возбуждения.

Амплитуда пробного сигнала задается таким образом, чтобы изменение уставки регулирования  $U_0$  выходного сигнала генератора не вызывало сильного дестабилизирующего воздействия на энергосистему и не приводило к нарушению ее устойчивости. Например, по действующим нормам допустимо изменение уставки напряжения на 5...10%, частоты генератора - на 0,5%.

Длительность импульсов пробного сигнала зависит от инерционных свойств применяемого электрического генератора и системы возбуждения и по опытным данным должна составлять не менее 0,5 с. Период повторения импульсов должен быть не менее длительности переходных процессов при начальных настройках параметров регулятора.

Положительная постоянная величина с определяется экспериментально. При малых значениях с увеличивается количество итераций и время оптимизации. При больших значениях с увеличивается дисперсия приращений оптимизируемых параметров;

процесс оптимизации может также носить шумоподобный характер.

Выработка случайных величин  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ , равномерно распределенных на интервале  $[0,1]$  производится любым известным способом, например, описанным в [3].

Каких-либо существенных ограничений на техническую реализацию способа не накладывается.

В результате производится автоматическая оптимизация параметров регулятора возбуждения синхронного электрического генератора на этапе ввода оборудования в эксплуатацию, не вызывающая сильного дестабилизирующего воздействия на энергосистему и не приводящая к нарушению ее устойчивости. При этом удовлетворяется критерий оптимизации, обеспечивающий одновременно минимальную величину и длительность переходных процессов в энергосистеме.

Экспериментально установлено, что при количестве оптимизируемых параметров регуляторов, входящих в состав системы автоматической регулировки возбуждения синхронного генератора, равном 10, количество итераций при оптимизации составляет 200 при относительной точности представления коэффициентов  $10^{-4}$ , при этом величина и длительность переходных процессов сокращается на 10% по сравнению с исходной ручной настройкой регулятора возбуждения.

Использованные источники:

1. Патент РФ №2014724 от 15.11.1990 г. Способ адаптивного регулирования возбуждения синхронного генератора.
2. Патент РФ №2068196 от 07.12.1992 г. Самонастраивающаяся система управления.
3. Park S.K., Miller K.W. Random Number Generators: Good ones are hard to find // Comm. ACM. N.10. Vol.32, 1988, P.1192-1201.

#### Формула изобретения

Способ настройки параметров регулятора возбуждения синхронного электрического генератора, который заключается в том, что устанавливают параметры регулятора, которым управляют возбуждением электрического генератора по отклонению от уставки одного из его выходных сигналов, отличающийся тем, что устанавливают начальное заведомо максимальное в используемой разрядной сетке значение критерия оптимизации параметров регулятора  $E_0$ , устанавливают новое значение  $i$ -го оптимизируемого параметра регулятора, вычисляемое по правилу  $x_i = x_{0i} + 2E_0 D_i (\alpha - 0,5) / c$ , скачкообразно изменяют уставку регулируемого выходного сигнала на постоянную величину на фиксированное время, измеряют величину и длительность переходного процесса регулируемого выходного сигнала генератора, вызванного указанным изменением уставки, вычисляют новое значение критерия оптимизации  $E$  как взвешенную сумму измеренных величин, сравнивают значения  $E$  и  $E_0$  и устанавливают значения  $E_0$  и  $x_i$  таким образом, что если выполняется условие  $E < E_0$  или одновременно выполняются условия:  $E \geq E_0$  и  $(E - E_0) / c \geq \beta$ , то устанавливают  $E_0 = E$  и  $x_{0i} = x_i$ , а параметр  $x_i$  не изменяют, в противном случае возвращают параметр  $x_i$  к исходному значению  $x_{0i}$ , циклически повторяют указанные операции для других оптимизируемых параметров регулирования вплоть до уменьшения средней скорости изменения величины  $E_0$  до заранее установленного значения, где  $x_{0i}$ ,  $D_i$  - соответственно исходное значение и диапазон изменения параметра  $x_i$ ;  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  - случайные величины, равномерно распределенные на интервале  $[0,1]$ ,  $c$  - положительная постоянная величина, определяющая скорость оптимизации.