

УДК 681.51

**Р.А. Нейдорф, П.А. Панков-Козочкин**

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСОВ  
УПРАВЛЕНИЯ**

*Приводятся результаты модификации и настройки метода роящихся частиц на задаче структурно-параметрической оптимизации частотных корректирующих устройств, оперативно настраиваемых искусственной нейронной сетью. Это необходимо для обучения её на большом объёме информации об оптимальных структурах и параметрах корректирующих устройств.*

*Частотное корректирующее устройство; поисковая оптимизация; метод роящихся частиц; критерий оптимизации; структура; параметры настройки.*

**R.A. Neydorf, P.A. Pankov-Kozochkin**

**STRUCTURALLY-PARAMETRICAL CONTROL RESOURCES  
OPTIMIZATION**

*Results of modification and customization of a particles swarming method for problems of structurally-parametrical optimization of the frequency correcting devices which are operatively adjusted by artificial neural network are shown. This is necessary for its training on great volume of information about optimum structures and parameters of correcting devices.*

*The frequency correcting device; search optimization; crowding particles method; optimization criterion; structure; adjustment parameters.*

Одним из существенных факторов энергосбережения является качество автоматического управления техническими системами и технологическими процессами. При этом известно, что наивысшее качество управления, в особенности сложными, нелинейными и нестационарными объектами может быть обеспечено только с использованием адаптивных систем управления. При разработке и реализации таких систем решаются две основных научно-технических задачи: динамическая идентификация свойств объекта в текущей области пространства состояний и оперативный синтез системы управления с выделением необходимого для качественного управления закона и введением в него оптимальных (или хотя бы субоптимальных) параметров настройки.

Авторами предпринята попытка решения второй задачи – оперативного структурно-параметрического синтеза устройств, корректирующих свойства основного управляющего устройства системы с целью компенсации влияния на качество управления изменившихся свойств объекта. При этом считается, что линеаризованная математическая модель системы в текущей области пространства состояний получена, и предоставлена системе коррекции закона управления в дифференциально-временной или частотной форме.

Исследование возможных подходов к расчету устройств коррекции управления позволило сделать вывод об эффективности давно известных частотных корректирующих устройств (ЧКУ), которые могут рассчитываться в алгебраической форме, т.е. практически мгновенно. При этом и структурная и параметрическая оптимизация их может осуществляться с использованием специально обученных «под объект» искусственных нейронных сетей.

Здесь нужно отметить, что структурно-параметрическая оптимизация закона управления также способствует энергосбережению ресурсов процесса управления.

Основу для предложенного в данной статье подхода положили работы авторов, посвящённые различным задачам частотной коррекции динамических свойств САУ. Так, в [1,2] изложены основные положения структурно-параметрического синтеза САУ путём расчёта последовательных частотных корректирующих устройств (ЧКУ). Эти устройства представляют собой совокупность так называемых АФИ-звеньев 1-го и 2-го порядков. Суть метода состоит в определении настроек ЧКУ, при которых обеспечивается требуемое качество регулирования замкнутой системы. Для упрощения и ускорения процесса синтеза предложено оценивать качество регулирования по вектору косвенных показателей качества, определяемых по ЛЧХ разомкнутой САУ [3]. В ходе дальнейших исследований была показана возможность использования эмпирически установленной взаимосвязи между косвенными показателями качества разомкнутой системы и прямыми показателями замкнутой САУ [4], а также показано, что при использовании для настройки ЧКУ не только косвенных, но и теоретически рассчитываемых прямых показателей повышается качество коррекции [5, 6].

Поиск оптимальных или хотя бы приемлемых настроек ЧКУ представляет собой довольно ресурсоёмкую процедуру, исключающую применение предложенного подхода в задачах управления, связанных с оперативным изменением настроек закона управления (ЗУ), в частности, при реализации задач адаптивного управления. Поэтому для реализации функции оперативного синтеза ЗУ со столь же оперативным изменением рассчитанных настроек ЧКУ предложено использовать специально обученные искусственные нейронные сети (ИНС) [3].

Очевидно, что для обучения ИНС необходимо иметь большую базу данных, включающую в себя совокупность входных критериальных оценок корректируемой системы и соответствующих им оптимальных (или близких к ним) выходных настроечных параметров ЧКУ. Для создания такой базы предложен и разработан алгоритм автоматизированного поиска близких к оптимальным настроек ЧКУ. Алгоритм разработан на основе математической модели (ММ) для САУ 3-го порядка [7, 8] с показателями качества, близкими к оптимальным. На основе этого алгоритма создано программное средство «LinCогг»<sup>©</sup> на М-языке среды MATLAB, обеспечивающее поиск настроек КУ для заданной НЧ САУ с использованием метода роящихся частиц (РЧ) [9]. Однако классическая версия этого метода оказалась малоприменимой для решения задачи синтеза оптимальных настроек ЧКУ в силу «овражистости» и разрывного характера зависимости показателей качества САУ от структуры и параметров устройства, что побудило авторов к исследованиям по повышению эффективности метода РЧ. Поэтому с помощью созданного программного средства были сначала проведены опыты по оптимизации параметров метода РЧ с целью получения наилучшего результата коррекции [10]. Они позволили определить такое сочетание настроек метода РЧ, при котором для ЧКУ первого порядка точнее и быстрее определялся параметрический оптимум пары его настроек.

Однако исследования показали, что такая реализация программы решения задач оптимизации процедуры синтеза САУ на основе ЧКУ имеет ряд недостатков.

Во-первых, поиск настроек ЧКУ производится для звеньев не сложнее второго порядка, причём после нахождения оптимальных настроек на каждом шаге найден-

---

<sup>©</sup> Программное средство создано П.А. Панковым-Козочкиным, аспирантом проф. Нейдорфа Р.А

ное звено фиксируется путём «добавления» к НЧ САУ. Это даёт возможность определить только локальный структурно-параметрический оптимум, а для нахождения глобального необходимо одновременно варьировать настройки всех звеньев КУ.

Во-вторых, скорость поиска настроек оказалась весьма невысокой, так как, с одной стороны, текст М-программы не оптимален по числу операций, а с другой, вычисления в MATLAB проводятся на основе виртуальной машины Java, что также снижает скорость вычислений.

С целью устранения указанных недостатков на языке C# разработана программа «LinCorr 2.0»<sup>©</sup>, основной особенностью которой является поиск настроек КУ путём одновременного варьирования параметров всех звеньев, входящих в КУ. Кроме того, оптимизирован текст программы, а также разработан более удобный пользовательский интерфейс (рис. 1), позволяющий, в частности, изменять параметры математической модели неизменяемой части САУ прямо в главном окне программы. Результаты поиска выводятся в два текстовых файла, а также в поле служебной информации в нижней части формы интерфейсного окна.

В статье [10] выделено 6 подлежащих уточнению свободных параметров метода роя частиц:

- ◆ ускорение особи к цели  $\alpha$  ;
- ◆ диапазон варьирования ускорения  $\Delta\alpha$  ;
- ◆ торможение  $\gamma$  ;
- ◆ изменение тормозящей силы  $\Delta\gamma$  ;
- ◆ отклонение цели  $\Delta\beta$  ;
- ◆ размер популяции роя  $N$ ,

а в качестве критериев оценки работы поискового метода выбраны суммарное изменение показателя качества относительно начального показателя ( $\Delta Q = Q^{фин} - Q^{исх}$ ) и суммарное число шагов на весь поиск ( $K^{сумм}$ ).

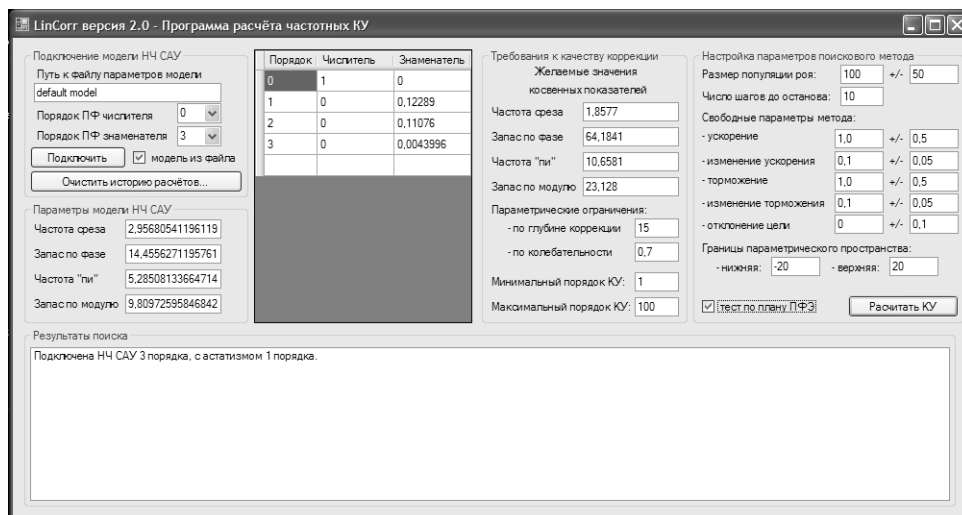


Рис. 1. Внешний вид интерфейса программы «LinCorr 2.0»

<sup>©</sup> Это программное средство также разработано П.А. Панковым-Козочкиным

Варьирование параметров метода РЧ производилось в соответствии с планом полного факторного эксперимента (ПФЭ). Статистический анализ результатов поддерживается пятью параллельными опытами в каждой точке плана. Значения уровней факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Факторы, существенные для метода**

№	Факторы	Уровни		
		- 1	0	+1
	Тяга к центру $\alpha$	0,5	1	1,5
	Изменение тяги к центру $\Delta\alpha$	0,05	0,1	0,15
	Торможение $\gamma$	0,5	1	1,5
	Изменение тормозящей силы $\Delta\gamma$	0,05	0,1	0,15
	Отклонение цели $\Delta\beta$	- 0,1	0	0,1
	Число точек роя $N$	50	100	150

Условия прекращения поиска настроек звена не варьировались. Для упрощения и без того объёмного эксперимента было принято, что таким условием является неизменность показателя качества коррекции  $Q$  в течение 10 шагов поиска.

Использование для инструментального обеспечения эксперимента более мощной программной среды позволило расширить его возможности. Была реализована достаточно сложная процедура структурно-параметрического синтеза ЧКУ, в которой использованы методы принятия решений на основе результатов текущей параметрической оптимизации исследуемой структуры ЧКУ. Синтез начинается с простейшего ЧКУ 1-го порядка, а далее, в случае неудачного исхода процедуры параметрической оптимизации настроек, порядок звена увеличивается на единицу, причём принимается решение об использовании дополнительного звена первого порядка, или замене исходного звена на звено второго порядка. Более подробно логика этой процедуры описана в [7].

Анализ результатов оптимизации ЧКУ по приведённому выше плану показывает, что всё их множество целесообразно разделить по признаку полученного порядка КУ на 2 подмножества:

- ◆ подмножество *структурно-минимальных* решений (в него входят КУ, имеющие минимальный порядок за данный поиск);
- ◆ подмножество *структурно-избыточных* решений (к ним относятся КУ, порядок которых больше минимального хотя бы на 1).

В результате, для проведённого эксперимента, состоящего из 320 опытов, состав подмножеств оказался таким, как показано в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты эксперимента**

	Порядок КУ	Количество решений	Максимальное улучшение $Q$
Структурно-минимальные решения	2	310	1,367497
Структурно-избыточные решения	3	10 (3,1%)	1,316191

По количеству структурно-избыточных решений можно косвенно судить о качестве поиска при тех или иных совокупностях настроек метода РЧ. Напри-

мер, в проведенном эксперименте 9 из 10 избыточных решений были получены при значениях размера роя  $N=50$ , однако не исключено и влияние прочих параметров метода на число избыточных решений. Кроме того, при каждом решении получены разные значения показателя улучшения функции качества  $\Delta Q$  и числа шагов  $K$ , в связи с чем необходимо произвести поиск оптимальных настроек метода РЧ, при которых бы достигалось максимальное значение  $\Delta Q$ , а также приемлемое значение  $K^{сумм}$  и малый процент избыточных решений, который обозначим  $P_{избыт}$ .

Для поиска такой совокупности можно воспользоваться таким регулярным методом, как градиентный метод крутого восхождения. Градиент легко определить по уравнениям регрессионных зависимостей для величин улучшения  $\Delta Q$  и числа шагов  $K^{сумм}$ , полученным по результатам эксперимента:

$$y_Q = 1,0919 - 0,0113x_1 - 0,0864x_3 + 0,0160x_6 - 0,0184x_1x_3 - 0,0064x_1x_5 - 0,0097x_2x_6 + 0,0143x_3x_6 + 0,0085x_5x_6, \quad (1)$$

$$y_K = 47,8031 - 18,2156x_3 + 2,7906x_4 - 1,9344x_6 - 1,9906x_1x_2 - 2,4531x_1x_3 - 1,4781x_2x_6 - 2,7031x_3x_4 + 1,6844x_5x_6, \quad (2)$$

Тогда выражение градиента будет иметь вид

$$\text{grad}(y_Q) = [-0,0113; 0; -0,0864; 0; 0; 0,0160]. \quad (3)$$

Для совершения шагов восхождения сначала необходимо получить величину шага, пронормировав вектор (3) по величине наибольшей составляющей по модулю

$$\text{grad}^*(y_Q) = [-0,13079; 0; -1; 0; 0; 0,18519], \quad (4)$$

а затем промасштабировав величину шага

$$\text{grad}_{scaled}^*(y_Q) = [-0,00654; 0; -0,05; 0; 0; 0,00926]. \quad (5)$$

В результате движения в направлении градиента (3) с шагом (5) получены результаты в 21-й точке, среди которых определена близкая к оптимальной совокупность настроек метода роя частиц (см. табл.3, № 17, выделено серым):

$$\alpha = 0,88883; \quad \Delta\alpha = 0,1; \quad \gamma = 0,15; \quad \Delta\gamma = 0,1; \quad \Delta\beta = 0; \quad N = 116. \quad (6)$$

Таблица 3

Результаты поиска оптимальных настроек МРЧ

№ шага	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\Delta\beta$	$N$	Порядок КУ	$\Delta Q_{сред}$	$K_{сред}$
0	1	0,1	1	0,1	0	100	2	1,138756	58,6
1	0,99346	0,1	0,95	0,1	0	101	2	1,181879	186
2	0,98692	0,1	0,9	0,1	0	102	2	1,186311	223,4

№ шага	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\Delta\beta$	$N$	Порядок КУ	$\Delta Q_{сред}$	$K_{сред}$
		0,1		0,1	0				
3	0,98038		0,85			103	2	1,211207	154,8
		0,1		0,1	0				
4	0,97384		0,8			104	2	1,149329	150,2
		0,1		0,1	0				
5	0,9673		0,75			105	2	1,113378	144,6
		0,1		0,1	0				
6	0,96076		0,7			106	2	1,178063	139
		0,1		0,1	0				
7	0,95422		0,65			107	2	1,144415	167,2
		0,1		0,1	0				
8	0,94769		0,6			107	2	1,164031	194,8
		0,1		0,1	0				
9	0,94115		0,55			108	2	1,179087	196,8
		0,1		0,1	0				
10	0,93461		0,5			109	2	1,185421	192
		0,1		0,1	0				
11	0,92807		0,45			110	2	1,20335	180,8
		0,1		0,1	0				
12	0,92153		0,4			111	2	1,195923	233,2
		0,1		0,1	0				
13	0,91499		0,35			112	2	1,203334	141
		0,1		0,1	0				
14	0,90845		0,3			113	2	1,202785	121,6
		0,1		0,1	0				
15	0,90191		0,25			114	2	1,197389	97,6
		0,1		0,1	0				
16	0,89537		0,2			115	2	1,188475	46,2
		0,1		0,1	0				
17	0,88883		0,15			116	2	1,222347	53,2
		0,1		0,1	0				
18	0,88229		0,1			117	2	1,193707	67,2
		0,1		0,1	0				
19	0,87575		0,05			118	2	1,191379	42,4
		0,1		0,1	0				
20	0,86921		0			119	2	1,147499	28

Здесь достигается максимальное улучшение качества САУ ( $\Delta Q_{сред}^{(17)} = 1,222347$ ) при приемлемом количестве шагов ( $K_{сред}^{(17)} = 53,2$ ,  $K_{сред}^{(17)} > 2 \cdot K_{сред}^{(20)}$ ,  $K_{сред}^{(17)} < K_{сред}^{(12)} / 4$ , где  $K_{сред}^{(20)}$  и  $K_{сред}^{(12)}$  – минимальное и максимальное число шагов соответственно), однако дополнительным показателем оптимальности настроек метода РЧ является-

ся процент нахождения структурно-избыточных решений  $P_{избыт}$ . Для его определения при настройках (6) проведено 10 000 опытов по определению структуры и параметров КУ. В результате получено всего 14 структурно-избыточных результатов 3 порядка, т.е.  $P_{избыт} = 0,14\%$  (против 3,1 % в исходном алгоритме) от общего числа опытов, при среднем улучшении качества коррекции  $\Delta Q_{сред} = 1,199924$  и среднем числе шагов на поиск  $K_{сред} = 55,88$ . И хотя прямое сравнение с первым экспериментом в данном случае не вполне корректно, так как полученные 10 избыточных решений из 320 определялись при разных совокупностях настроек метода и всего при 5 повторных опытах, однако столь малое значение  $P_{избыт}$  позволяет говорить о близости настроек (6) к оптимальным.

**Выводы.** По результатам опытов можно сказать, что появление структурно-избыточных решений носит случайный характер, а полученные в таких случаях значения показателя качества коррекции говорят о том, что поиск проходит не вполне удачно. Исключение – одно из решений третьего порядка, давшее близкий к наилучшему результат за весь поиск, и показавшее, что в случае структурно-избыточных результатов есть возможность получить такой же, или даже более качественный, результат коррекции по сравнению со структурно-минимальными звеньями. Однако в соответствии с концепцией структурно-параметрической оптимизации [3], оптимум соответствует параметрически наилучшему варианту коррекции звеном второго порядка.

В связи с этим, предполагается в будущем реализовать автоматическое разделение результатов синтеза КУ на структурно-минимальные и структурно-избыточные. Это позволит проектировщику выбирать то или иное решение, соотносясь с эвристическими решениями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А., Коломиец Н.* Возможности частотной коррекции динамических свойств САУ инерционно-форсирующими звеньями первого порядка // Научное знание: новые реалии: сб. нач.-иссл. работ. Вып. 2. – М.: Уч.-метод. и издат. Центр «Учебная литература», 2006.
2. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А.* Задачи и возможности коррекции САУ амплитудо-фазоискажающими звеньями второго порядка // Системный анализ, управление и обработка информации: сборник научных статей. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2007. – С. 234-241.
3. *Панков-Козочкин П.А.* Использование нейросетевых технологий для синтеза и коррекции законов управления // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20: сб. трудов XX Международ. науч. конф. Т.10. – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2007. – С.119-120.
4. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А.* Математическая модель связи прямых и косвенных показателей качества замкнутых автоматических систем // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21. Т.11. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. техн. ун-та, 2008. – С. 84-87.
5. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А.* Параметрическая оптимизация корректирующих устройств САУ по косвенным показателям качества // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. трудов XXII Международ. науч. конф. Т.11. – Иваново, 2009.
6. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А.* Параметрическая оптимизация корректирующих устройств САУ с оценкой прямых показателей качества по косвенным // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. трудов XXII Международ. науч. конф. Т.11. – Иваново, 2009.
7. *Панков-Козочкин П.А.* Алгоритм подготовки задачи нейросетевой оперативной коррекции САУ // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'09». Т.3. – М.: Физматлит, 2009. – С. 290-295.

8. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А.* Быстрый алгоритм структурно-параметрической оптимизации корректирующих устройств на основе амплитудофазоискажающих звеньев / Р.А. Нейдорф, П.А. Панков-Козочкин // Вестник ДГТУ, Т.9. Спец. вып. 2009. – С. 17-26.
9. *Нейдорф Р.А., Панков-Козочкин П.А.* Применение эвристических методов оптимизации для подготовки задачи нейросетевой оперативной коррекции САУ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22 [Текст]: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. В 11т. Т.11. Международный научно-методический симпозиум «Современные проблемы многоуровневого образования». – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2009. – С. 121-127.
10. *Панков-Козочкин П.А.* Параметрическая оптимизация метода роящихся частиц для задач структурно-параметрического синтеза САУ // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22 [Текст]: сб. трудов XXII Междунар. науч. конф. В 11т. Т.11. Международный научно-методический симпозиум «Современные проблемы многоуровневого образования» – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2009. – С. 127-130.

**Нейдорф Рудольф Анатольевич**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет» в г. Ростове-на-Дону.

E-mail: neyruan@yandex.ru

344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Тел.: 88632910764.

Кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; заведующий кафедрой; профессор.

**Панков-Козочкин Павел Александрович**

E-mail: voland1900@mail.ru.

Тел.: 89515344107.

Кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; старший преподаватель.

**Neydorf Rudolf Anatolievitch**

State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Don State Technical University” at the Rostov-on-Don city.

E-mail: neyruan@yandex.ru

Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, 344010, Russia.

Phone: 88632910764.

The Computing Machine and Automated System Software department; chairman; professor.

**Pankov-Kozochkin Pavel Alexandrovich**

E-mail: voland1900@mail.ru.

Phone: 89515344107.

The Computing Machine and Automated System Software department; senior teacher.

УДК 620.9.001.12.18

**В.Ю. Евтушенко, Е.Ю. Косенко**

**НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВЫМ КОТЛОМ**

*Рассматриваются вопросы управления сложными техническими системами в области энергетики. В данной работе внимание уделяется, нечетким системам управления двигателем в паровом котле.*

*Паровой котел; управление.*