

# Влияние стратегии популяционных алгоритмов: алгоритм поиска гармонии, ПТУ с двумя отборами

М. В. Конюшин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
Санкт-Петербург, Россия  
konyushin\_mv@spbstu.ru

**Аннотация.** В последнее время активно рассматривается применение эвристических и метаэвристических алгоритмов (методов) оптимизации, например, популяционных алгоритмов, для решения задачи определения наилучших характеристик систем и оборудования, например, с целью повышения их энергоэффективности. Однако, в случае использования популяционных алгоритмов оптимизации, возникает вопрос выбора вектора свободных параметров используемого алгоритма, т.к. данный вектор влияет на результат решения оптимизационной задачи, другими словами необходимо осуществить выбор стратегии алгоритма. В работе рассмотрено влияние стратегии алгоритма поиска гармонии на результат решения задачи по определению оптимального значения давления в первом отборе простейшей паротурбинной установки с двумя отборами пара.

**Ключевые слова:** эвристические алгоритмы, метаэвристические алгоритмы, вектор свободных параметров алгоритма, оптимизация тепловых схем, энергоэффективность ТЭС, энергоэффективность АЭС

## I. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### A. Применение эвристических и метаэвристических алгоритмов в энергетике

Одним из вариантов выявления энергоэффективных решений в области энергетики является определение оптимальных параметров энергетической системы и(или) оборудования, входящего в такого рода системы. На протяжении всего развития энергетики рассматриваются решения различных оптимизационных задач. При решении такого рода задач достаточно хорошо себя зарекомендовали методы слепого и направленного поиска. Использованию таких методов было посвящено огромное количество работ, например, стоит упомянуть работу [1], где описано решение различных задач оптимизации для атомных электрических станций (АЭС).

С конца 70-х гг. XX века для решения оптимизационных задач стали внедряться эвристические и метаэвристические методы (алгоритмы) оптимизации, основанные на использовании интуитивного подхода при нахождении оптимального решения поставленной задачи. Эвристические и метаэвристические алгоритмы оптимизации рассматривают применение законов живой и неживой природы для нахождения оптимального решения. Однако при использовании таких алгоритмов происходит поиск оптимального решения с необходимой для лица, принимающего решение (ЛПР), точностью за приемлемое для ЛПР время нахождения решения.

Несмотря на ограничения, вызванные применением эвристических и метаэвристических алгоритмов при решении оптимизационных задач, они нашли широкое применение в области энергетики, т.к. в некоторых моментах невозможно найти абсолютное точное решение рассматриваемой ЛПР оптимизационной задачи из-за наличия различного рода допущений и(или) неопределенностью параметров систем и(или) оборудования. Так, например, с использованием эвристических и метаэвристических алгоритмов оптимизации было проведено решение следующих задач в области энергетики:

- распределение реактивной мощности в электроэнергетической системе [2];
- распределение вырабатываемой мощности на тепловых электрических станциях [3];
- оптимальное расположение тепловыделяющих сборок в ядерном реакторе [4];
- термoeкономический анализ тепловых схем АЭС [5];
- и многих других.

Таким образом, как показывают результаты исследований, в последнее время очень активно рассматривается применение эвристических и метаэвристических алгоритмов, к которым также относятся и популяционные алгоритмы, для решения различных задач в области энергетики.

Рассмотрим один из популяционных алгоритмов – алгоритм поиска гармонии.

### B. Алгоритм поиска гармонии

Алгоритм поиска гармонии (Harmony Search Algorithm, HSA) – это один из популяционных алгоритмов оптимизации, который был предложен К.С. Ли и З.В. Джеемом (Kang Seok Lee, Zong Woo Geem) в 2005 году [6]. Этот алгоритм изначально был предложен авторами для решения инженерных оптимизационных задач.

Данный алгоритм был вдохновлен процессами, происходящими при исполнении музыкальных произведений. Музыкант-исполнитель в процессе импровизации при исполнении музыкального произведения подбирает нужную ноту с целью достижения наилучшей гармонии произведения. При интерпретации данного действия в математическом плане, в процессе поиска каждое решение из множества допустимых порождает значение функции с целью достижения глобального экстремума [7].

Общая схема работы алгоритма приведена на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема работы HSA

Каждый эвристический и метаэвристический алгоритм оптимизации обладает своими параметрами, которые необходимо задать до нахождения оптимального решения выбранным алгоритмом. Эти параметры называются свободными параметрами алгоритма или стратегией алгоритма [8].

Свободные параметры HSA следующие:

- размер памяти гармонии  $hms$ ;
- частота выбора значений из памяти гармонии  $hmcr$ ;
- частота выбора соседнего значения  $par$ ;
- вектор максимального изменения приращения  $fw$ .

В общем случае критерием окончания работы алгоритма является достижение заданного количества итераций поиска  $K$ .

### С. Выбор стратегии алгоритма

Стоит помнить, что топология целевой функции отличается для различных задач оптимизации [8]. В результате этого выбранная стратегия алгоритма для решения конкретной оптимизационной задачи не может гарантировать определение наиболее лучшего решения для всех возможных задач, которые могут быть решены с использованием выбранного алгоритма оптимизации.

Для обоснования использования разработанного популяционного алгоритма оптимизации, разработчики алгоритмов апробируют его на тестовых функциях, например, на функциях Гриванка (Griewank's Function), функции Растригина (Rastrigin's Function) и многих других [9]. При апробировании выбирается конкретная стратегия алгоритма.

Однако, на основании упомянутого ранее обстоятельства, что топология целевой функции различна для конкретной задачи оптимизации, использование стратегии алгоритма, определенной на тестовой функции, для решения всех возможных задач оптимизации, не представляется возможным, потому что невозможно гарантировать оптимальность результата работы алгоритма.

Стратегия выбранного популяционного алгоритма может быть определена путем решения задачи мета-оптимизации, в результате которой находят наилучшую стратегию алгоритма [10].

Если рассмотреть применение популяционных алгоритмов для решения задач в области энергоэффективности атомных электрических станций (АЭС), к сожалению, в опубликованных исследованиях по определению оптимальных значений параметров тепловых схем АЭС, например, в работах [5, 11], не приводятся рекомендации по стратегиям популяционных алгоритмов.

## II. МЕТОДОЛОГИЯ

### А. Рассмотренная задача оптимизации

Рассмотрим задачу по оптимизации параметров тепловой схемы простейшей паротурбинной установки (ПТУ) с двумя отборами пара. Принципиальная тепловая схема рассмотренной ПТУ приведена на рис. 2.

ПТУ состоит из следующих элементов: паровая турбина (1), электрогенератор (2), конденсатор (3), питательный насос (4), подогреватели питательной воды (5, 6).

Определяющими характеристиками энергоэффективности ПТУ являются: внутренняя мощность паровой турбины и термический коэффициент полезного действия (КПД) установки.

На указанные характеристики влияет огромное количество параметров ПТУ: параметры греющего пара, температура питательной воды, параметры отборов пара, температура охлаждающей воды в конденсаторе, недогревы в подогревателях, относительный внутренний КПД отсеков турбины и т. д.

При оптимизации тепловых схем АЭС популяционными алгоритмами исследователи используют в качестве оптимизируемых параметров значения давлений в отборах турбины и температуры основного конденсата и питательной воды за подогревателями низкого и высокого давления. Например, в работе [5] именно эти параметры были выбраны в качестве оптимизируемых параметров решения оптимизационной задачи.

Возьмем в качестве оптимизируемого параметра значение давления пара в первом отборе паровой турбины. Выбор только одного оптимизируемого параметра обусловлен следующим:

- для уменьшения времени нахождения оптимального решения;
- задачей является исследование влияния выбора стратегии алгоритма, а не оптимизируемых параметров.

Таким образом, все остальные параметры, за исключением оптимизируемого параметра являются фиксированными или рассчитываемыми.

К фиксированным параметрам были отнесены следующие: давление, температура и расход греющего пара; давление в конденсаторе; температура охлаждающей воды на входе в конденсатор; недогревы в конденсаторе, подогревателях; относительный внутренний КПД турбинных отсеков; давление пара во втором отборе.

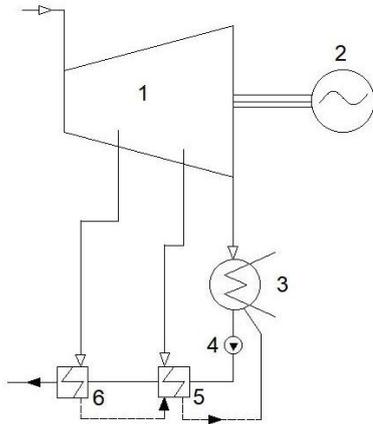


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема ПТУ с двумя отборами

Основными рассчитываемыми параметрами стали: внутренняя мощность паровой турбины и термический КПД установки.

Из рассмотрения было исключено следующее: мощность на клеммах электрогенератора (параметр однозначно взаимосвязан с внутренней мощностью турбины); потери давления среды в установке; утечки среды из установки.

При выполнении предварительных оптимизационных расчетов рассмотренной ПТУ с использованием алгоритма HSA было выявлено быстрая сходимость решения задачи к одному значению при использовании термического КПД в качестве функции приспособленности (функции по которой определяется оптимальность решения). Причем количество итераций не влияло на сходимость решения (были рассмотрены варианты от 10 до 100 итераций с шагом 10).

В результате этого в рассматриваемой задаче в качестве функции приспособленности было выбрано значение внутренней мощности ПТУ, потому что при увеличении количества итераций происходит переход на более оптимальное значение давления пара в первом отборе.

На рис. 3 представлены графики сходимости нахождения оптимального решения при различном количестве итераций с использованием в качестве функции приспособленности внутренней мощности ПТУ. Графики построены для случаев от 10 до 100 итераций с шагом 10.

Предварительные оптимизационные расчеты были выполнены со следующими значениями свободных параметров алгоритма, рекомендуемых в работе [7]:

- размер памяти гармонии  $hms=30$ ;
- частота выбора значений из памяти гармонии  $hmcr=0,9$ ;

- частота выбора соседнего значения  $par=0,3$ ;
- вектор максимального изменения приращения  $fw=0,015$ .

Оценим влияние выбора стратегии алгоритма HSA для рассматриваемой задачи оптимизации.

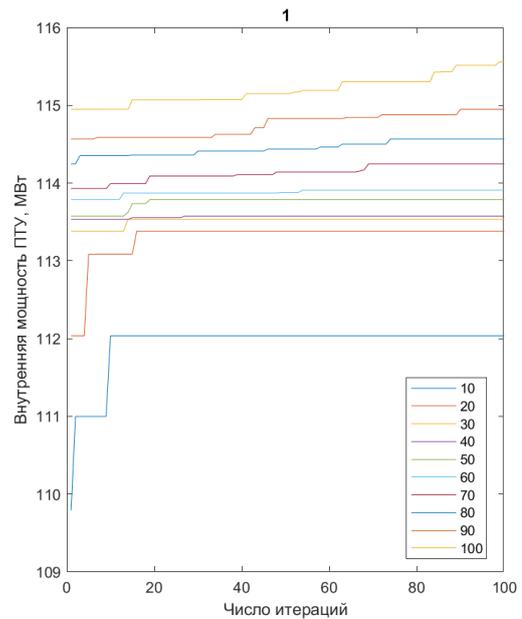


Рис. 3. Графики сходимости нахождения оптимального решения при различном количестве итераций с использованием ПТУ в качестве функции приспособленности внутренней мощности ПТУ

#### В. Методика вычислительного эксперимента

Для определения влияния выбора стратегии алгоритма HSA на результат решения рассмотренной задачи оптимизации был выполнен вычислительный эксперимент.

Согласно методике планирования экспериментов, был составлен план эксперимента с учетом варьирования свободных параметров алгоритма HSA.

Были использованы следующие предельные значения свободных параметров алгоритма, рекомендуемые в работе [7]:

- размер памяти гармонии  $hms – 10$  и  $100$ ;
- частота выбора значений из памяти гармонии  $hmcr – 0,7$  и  $0,99$ ;
- частота выбора соседнего значения  $par – 0,1$  и  $0,5$ ;
- вектор максимального изменения приращения  $fw – 0,0015$  и  $0,015$ .

Таким образом, необходимо выполнить 16 экспериментов с различными вариантами значений свободных параметров.

Для определения значимости каждого свободного параметра необходимо построить диаграмму рассеяния результатов эксперимента [1]. Критерием значимости рассматриваемого фактора являются:

- разности значений медиан результатов эксперимента для каждого предельного значения параметра;
- количество выделившихся точек, т.е. то количество точек, для которых результаты

экспериментов больше или меньше, чем самое большое или малое значение результата для каждого предельного значения параметра.

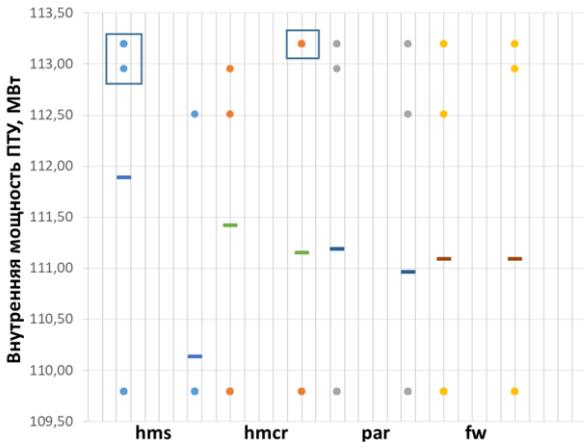


Рис. 4. Диаграмма рассеяния результатов экспериментов для случая «1 итерация»

По определенным разностям значений медиан результатов эксперимента и числа выделившихся точек, можно определить следующие значимости параметра [1]:

- большая разность значений медиан и большое число выделившихся точек – очень сильное влияние;
- большая разность значений медиан и малое число выделившихся точек – сильное влияние;
- малая разность значений медиан и большое число выделившихся точек – достаточное влияние;
- малая разность значений медиан и малое число выделившихся точек – низкое влияние.

В связи с тем, что на результат работы алгоритма HSA влияет количество итераций работы алгоритма, необходимо рассмотреть влияние свободных параметров при различных значениях итераций.

В результате были проведены вычислительные эксперименты рассмотренной задачи оптимизации параметров тепловой схемы ПТУ с двумя отборами пара для указанных ранее предельных значений свободных параметров алгоритма при значениях итераций работы алгоритма 1, 10 и 100 итераций. Для каждого рассмотренного случая количества итераций были построены диаграммы рассеяния

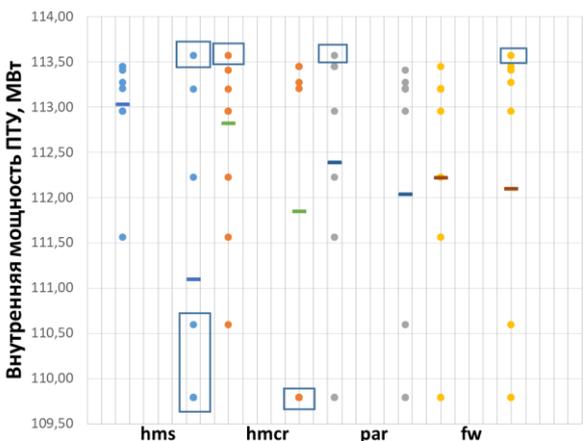


Рис. 5. Диаграмма рассеяния результатов экспериментов для случая «10 итераций»

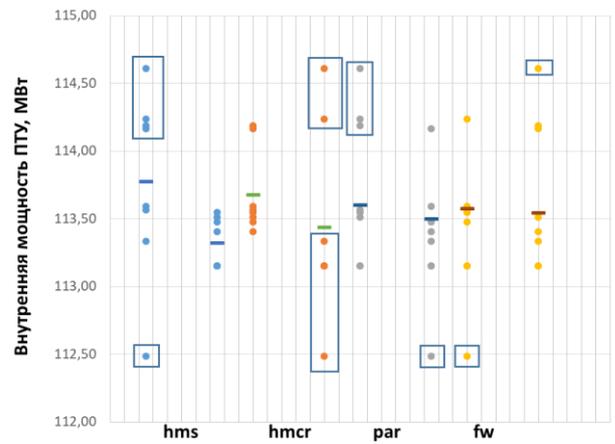


Рис. 6. Диаграмма рассеяния результатов экспериментов для случая «100 итераций»

для определения значимости свободных параметров алгоритма.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### A. Диаграммы рассеяния результатов эксперимента

На рис. 4, 5 и 6 представлены диаграммы рассеяния результатов вычислительного эксперимента для случаев «1 итерация», «10 итераций» и «100 итераций» работы алгоритма HSA. На рисунках применены следующие обозначения:

- левое значение свободного параметра обозначает минимальное значение параметра, правое значение – максимальное значение параметра;
- точками обозначены значения результатов экспериментов;
- чертами обозначены значения медиан результатов экспериментов;
- прямоугольниками обозначены выделившиеся точки.

#### B. Значимость свободных параметров алгоритма

В таблице приведены разности значений медиан, число выделившихся точек и значимость свободных параметров, определенная согласно описанным ранее правилам, для всех рассмотренных вариантов.

При определении значимости параметров, было принято, что большая разность значений медиан соответствует значению разности больше или равно 0,25 МВт, большое число выделившихся точек – больше или равно 3.

По результатам, представленным в таблице, можно сделать следующие выводы по влиянию свободных параметров:

- размер памяти гармонии *hms* является определяющим параметром, потому что он содержит всю совокупность популяции, и чем больше популяция, тем больше существует возможных вариантов решения;
- частота выбора значений из памяти гармонии *hmcr* в основном принимает значение «очень сильное», т.к. по нему определяется выбор новых значений;
- частота выбора соседнего значения *par* принимает все возможные значения влияния, невозможно однозначно понять его влияние;

ТАБЛИЦА I ЗНАЧИМОСТЬ СВОБОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Вариант	Свободный параметр	Разность значений медиан, МВт	Число выделившихся точек			Влияние параметра
			для нижнего предела параметра	для верхнего предела параметра	Итого	
1 итерация	hms	1,76	5	0	5	очень сильное
	hmcr	0,26	0	4	4	очень сильное
	par	0,23	0	0	0	низкое
	fw	0,00	0	0	0	низкое
10 итераций	hms	1,94	0	6	6	очень сильное
	hmcr	0,98	1	4	5	очень сильное
	par	0,35	1	0	1	сильное
	fw	0,12	0	1	1	низкое
100 итераций	hms	0,45	5	0	5	очень сильное
	hmcr	0,24	0	8	8	достаточное
	par	0,10	3	1	4	достаточное
	fw	0,03	1	1	2	низкое

- вектор максимального изменения приращения  $fw$  оказывает «низкое» влияние.

Как видно из представленных результатов влияния свободных параметров алгоритма HSA при решении задачи оптимизации тепловой схемы простейшей ПТУ с двумя отборами пара, не все параметры оказывают однозначного влияния на результат нахождения оптимального решения задачи.

Таким образом, невозможно сказать, что выбранная стратегия алгоритма по рекомендуемым значениям свободных параметров в литературе будет однозначно находить наиболее оптимальное решение поставленной задачи оптимизации. Необходимо более детальное определение стратегии алгоритма оптимизации при решении конкретных задач оптимизации.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования было рассмотрено применение алгоритма HSA при решении задачи оптимизации тепловой схемы простейшей ПТУ с двумя отборами пара с различными значениями свободных параметров алгоритма (стратегии алгоритма).

В результате оценки влияния свободных параметров было выявлено неоднозначное влияние значений свободных параметров на результат нахождения оптимального решения заданной задачи оптимизации.

Таким образом, при использовании популяционных алгоритмов при решении конкретных задач оптимизации в инженерной практике, в том числе для определения энергоэффективности систем и оборудования, необходимо проводить более детальный выбор стратегии алгоритма для получения наиболее оптимального решения для конкретной поставленной задачи оптимизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация атомных электростанций. М: Наука, 1984. 348 с.
- [2] Ahmed M.K. Optimal reactive power dispatch in power system comprising renewable energy sources by means of a multi-objective particle swarm algorithm / M.K. Ahmed, M.H. Osman, N. Korovkin // Materials science. Power Engineering. 2021. Vol. 27. No 1. P. 5-20.
- [3] Bhattacharya A., Chattopadhyay P.K. Hybrid differential evolution with biogeography-based optimization for solution of economic load dispatch // IEEE Transactions on Power Systems. 2010. Vol. 25. No 4, P. 1955-1964.
- [4] Mahmoudi S.M. A novel optimization method, Gravitational Search Algorithm (GSA), for PWR core optimization / S. M. Mahmoudi, M. Aghaie, M. Bahonar, N. Poursalehi // Annals of Nuclear Energy. 2016. Vol. 95. P. 23-34.
- [5] Naserbegi A. A novel exergy optimization of Bushehr nuclear power plant by gravitational search algorithm (GSA) / A. Naserbegi, M. Aghaie, A. Minucmehr, Gh. Alahyarizadeh // Energy. 2018. Vol. 148. P. 373-385.
- [6] Lee K.S., Geem Z.W. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2005. Vol. 194. 1.36-38. P. 3902-3933.
- [7] Пантелеев А.В., Скавинская Д.В. Метаэвристические алгоритмы глобальной оптимизации. М.: Вузовская книга, 2019. 332 с.
- [8] Агасиев Т.А.О., Карпенко А.П. Настройка алгоритмов параметрической оптимизации проектных решений при решении серийных задач автоматизированного проектирования // Системы компьютерной математики и их приложения. 2021. № 22. С. 11-20.
- [9] Mirjalili S., Lewis A. The Whale Optimization Algorithm // Advances in Engineering Software. 2016. Vol. 95. P. 51-67.
- [10] Агасиев Т.А.О., Карпенко А.П. Настройка алгоритмов решения серийных задач параметрической оптимизации // Системы компьютерной математики и их приложения. 2020. № 21. С. 80-87.
- [11] Ebrahimgol H. A novel approach in exergy optimization of a WWER1000 nuclear power plant using whale optimization algorithm / H. Ebrahimgol, M. Aghaie, A. Zolfaghari, A. Naserbegi // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 145. 107540.