

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КРАТКОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ

<sup>1</sup>Гойилов Т.Ш., <sup>2</sup>Саъдуллаев А.Б., <sup>3</sup>Умиров А.П., <sup>4</sup>Ибрагимов И.И.

<sup>1</sup>Гойилов Тулкин Шерназарович – доктор технических наук, профессор, Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан  
e-mail: [tulgayibov@gmail.com](mailto:tulgayibov@gmail.com) Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

<sup>2</sup>Саъдуллаев Аловиддин Бобакулович - кандидат физико-математических наук, доцент, Каршинский инженерно-экономический институт, г Карши Республика Узбекистан.  
e-mail: [aloviddinsadullayev@gmail.com](mailto:aloviddinsadullayev@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-2817-9378>

<sup>3</sup>Умиров Асрор Пардаевич – ст.преподаватель, Каршинский инженерно-экономический институт, г Карши, Узбекистан. e-mail: [asrorpardayevich@gmail.com](mailto:asrorpardayevich@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-7147-9827>

<sup>4</sup>Ибрагимов Искандар Исроилович-ассистент, Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан. e-mail: [iskandarisorilovich@gmail.com](mailto:iskandarisorilovich@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-6315-3069>

**Аннотация:** В статье приводятся результаты исследования эффективности применения генетического алгоритма оптимизации для решения задачи планирования краткосрочных режимов современных электроэнергетических систем с учетом реальных энергетических характеристик различных электростанций и ограничивающих условий, представляемых в виде равенств и неравенств.

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы оптимизации, эффективности применения, оптимизации градиентными методами и методами Ньютона, множители Лагранжа, суточный график.

**Abstract:** The article presents the results of the study results of research the effectiveness of applying a genetic algorithm of optimization in solving the problems of planning the short-term modes of modern electric power systems taking into account the real energy characteristics of different types of power plants and constraints, which are presented in form equalities and inequalities.

**Keywords:** genetic optimization algorithms, application efficiency, optimization by gradient methods and Newton methods, Lagrange multipliers, daily graph.

В последние годы во многих отраслях экономики для решения сложных, нелинейных и математически трудно формируемых задач начинают использовать различные эволюционные алгоритмы, в число которых входят также генетические алгоритмы [1-3]. Такие возможности создаются благодаря бурному развитию в последние годы информационной технологии и вычислительных средств.

Генетические алгоритмы оптимизации имеют ряд преимуществ перед традиционными алгоритмами, основными из которых являются следующие:

- 1) возможность определения глобального экстремума в многоэкстремальных задачах;
- 2) возможность работы с разрывными целевыми функциями (не требуется непрерывность и дифференцируемость целевой функции);
- 3) возможность более простого учета простых и функциональных ограничений в виде равенств и неравенств.

Эти преимущества генетического алгоритма создают хорошие предпосылки для их эффективного использования в решении задач оптимизации режимов современных электроэнергетических систем, которые представляют собой службную задачу нелинейного математического программирования.

В данной работе приводятся результаты исследования эффективности применения генетических алгоритмов для решения задач оптимизации режимов электроэнергетических систем. Как известно, ввиду большой размерности и требуемого объема исходной и промежуточной информации, в настоящее время задачу комплексной оптимизации режимов электроэнергетических систем решают на основе декомпозиции на две задачи – оптимизацию режимов электроэнергетических систем по активной мощности и оптимизацию режимов

электрических сетей. В данной работе прифодятся результаты исследования эффективности применения генетического алгоритма для решения первой задачи, получаемой в результате декомпозиции. Рассматриваемая задача в краткосрочном (например, в суточном) цикле регулирования, в общем случае, формулируется в следующем виде:

минимизировать целевую функцию, представляющую собой функцию суммарных топливных издержек в тепловых электростанциях за сутки:

$$B = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^n B_{it}(P_{it}) \rightarrow \min \quad (1)$$

с учетом ограничений по балансу активной мощности в энергосистеме в каждом часу суток

$$\sum_{i=1}^n P_{it} + \sum_{j=1}^m P_{jt} + P_{BЭt} = P_{нт} + \pi_t, \quad t = 1, 2, \dots, 24; \quad (2)$$

по минимальным и максимальным возможным мощностям регулируемых электростанций

$$P_{it}^{\min} \leq P_{it} \leq P_{it}^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad t = 1, 2, \dots, 24; \quad (3)$$

$$P_{jt}^{\min} \leq P_{jt} \leq P_{jt}^{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad t = 1, 2, \dots, 24. \quad (4)$$

по допустимым потокам мощностей в контролируемых линиях электропередачи

$$P_{lt}^{\min} \leq P_{lt} \leq P_{lt}^{\max}, \quad l = 1, 2, \dots, L_p, \quad t = 1, 2, \dots, 24; \quad (5)$$

по расходам воды за цикл регулирования в ГЭС, участвующих в оптимизации

$$\Delta Q_j = \sum_{t=1}^{24} Q_{jt}(H_{jt}, P_{jt}) - Q_{jз} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где  $B$  – топливные издержки в  $n$  ТЭС, участвующие в оптимизации, за цикл регулирования;  $P_{it}, P_{jt}$  – мощности  $i$ -й ТЭС и  $j$ -й ГЭС в  $t$ -м часу суток;  $P_{нт}$  – суммарная нагрузка потребителей в энергосистеме в  $t$ -м часу суток;  $\pi_t$  – суммарные потери активной мощности в электрических сетях энергосистемы в  $t$ -м часу суток;  $P_{BЭ,t}$  – суммарная мощность электростанций, работающих на возобновляемые энергоресурсы в  $t$ -м часу суток;  $P_{it}^{\min}, P_{it}^{\max}, P_{jt}^{\min}, P_{jt}^{\max}$  – минимальные и максимальные возможные мощности  $i$ -й ТЭС и  $j$ -й ГЭС в  $t$ -м часу суток (при оптимальном составе работающих агрегатов в электростанциях);  $P_{lt}$  – поток активной мощности в контролируемой  $l$ -й линии в  $t$ -м часу суток;  $P_{lt}^{\min}, P_{lt}^{\max}$  – минимальная и максимальная допустимые потоки мощности в  $l$ -й контролируемой линии в  $t$ -м часу суток;  $L_p$  – число линий электропередачи, в которых контролируются потоки активной мощности;  $H_{jt}, Q_{jt}$  – напор и расход воды в  $j$ -й ГЭС в  $t$ -м часу суток;  $Q_{jз}$  – заданный объем воды, который должен быть израсходован в  $j$ -й ГЭС в течение суток.

Энергетические характеристики станций, в частности ТЭС и ГЭС, участвующих в оптимизации обычно задаются в табличном виде и имеют кусочно-линейный характер. Разработанный на кафедре “Электрические станции, сети и системы” ТГТУ генетический алгоритм оптимизации режима энергосистемы [3] позволяет вести оптимизацию по этим реальным характеристикам (без их предварительной аппроксимации). Это приводит к повышению точности оптимизации с получением соответствующего экономического эффекта.

Другая проблема, связанная с учетом функциональных ограничений в виде неравенства, характерная для традиционных алгоритмов, в генетическом алгоритме преодолевается посредством учета их штрафными функциями в экспоненциальной форме.

В традиционных и широко распространенных алгоритмах оптимизации (например, в алгоритмах оптимизации градиентными методами и методами Ньютона) [4,5] функциональные ограничения типа (5) учитываются квадратичными штрафными функциями, которые, по существу, приспособлены для учета ограничений в виде равенств. Поэтому, при использовании такой формы штрафной функции перед выполнением каждой итерации проверяется выполнение ограничения и на этой основе определяется необходимость учета её при выполнении следующей итерации. Исследованиями выявлено, что учет ограничений

таким образом часто приводит к потере надежности сходимости итеративного процесса. Кроме того, такая процедура расчета не приемлема для генетических алгоритмов.

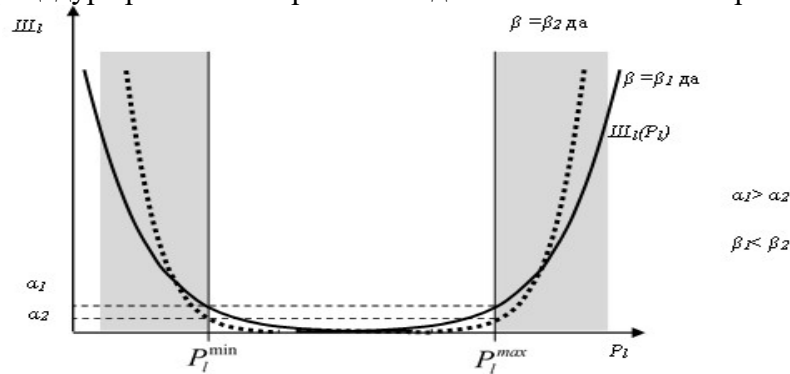


Рис.1. Графики экспоненциальной штрафной функции, учитывающей ограничения по потоку мощности в контролируемой линии электропередачи.

С учетом отмеченного выше обстоятельств в генетическом алгоритме оптимизации принят учет функциональных ограничений в виде равенств штрафными функциями в экспоненциальной форме [6,7], которая для учета ограничения в виде (5) для какого-то часа суток имеет следующий вид:

$$Ш_i = \alpha \left( e^{\beta(-P_i + P_i^{min})} + e^{\beta(P_i - P_i^{max})} \right), \tag{7}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – штрафные (весовые) коэффициенты. На рисунке -1 представлены графики штрафной функции при различных значениях штрафных коэффициентов. Интегральные ограничения по расходу воды в течении цикла регулирования в ГЭС, участвующих в оптимизации (6) в генетическом алгоритме можно учитывать двумя способами. По первому способу оптимизация мощностей всех станций за цикл регулирования (во всех часовых интервалах суток) определяется в один прием. При этом размерность однократно решаемой задачи оптимизации примерно в 24 раза больше, чем в задаче оптимизации режима для одного часа.

По второму способу оптимальное планирование для цикла регулирования осуществляется на основе решения задачи оптимизации отдельно для каждого часа суток. Этот способ предусматривает приведения ГЭС на каждой итерации к эквивалентным ГЭС (расчетном смысле), перемножая их энергетические характеристики на соответствующие множители Лагранжа  $\lambda_j$ , представляющих собой топливные эквиваленты расходов воды. Эти множители определяются комбинированным методом, описанным в [7-14].

Вычислительная эффективность описанного алгоритма исследована, в частности, на примере оптимального покрытия нагрузки энергосистемы четырьмя ГЭС с реальными разрывными характеристиками относительных приростов расхода условного топлива, которые приведены в таблице 1.

По трем линиям электропередачи контролируются потоки активной мощности:

$$P_{6-3} \leq 575 \text{ МВт}, \quad P_{6-5} \leq 200 \text{ МВт}, \quad P_{0-3} \leq 75 \text{ МВт}.$$

Мощности нагрузочных узлов:

$$P_2 = 400 \text{ МВт}, \quad P_3 = 600 \text{ МВт}, \quad P_4 = 200 \text{ МВт}, \quad P_5 = 500 \text{ МВт}.$$

Потоки мощностей по контролируемым линиям электропередачи определялись по следующей линеаризованной формуле с использованием коэффициентов распределения мощностей узлов по ним  $C_{li}$ ,  $C_{lj}$ :

$$P_l = \sum_{i \in \Gamma} C_{li} P_i^G - \sum_{j \in H} C_{lj} P_j^H + P_{l0}, \tag{8}$$

где  $\Gamma$ ,  $H$  – множества генерирующих и нагрузочных узлов;  $P_{li}^G$ ,  $P_{lj}^H$  – мощности  $i$ -й генерирующей и  $j$ -й нагрузочной узлов;  $P_{l0}$  – свободный член линеаризованного выражения.

Коэффициенты распределения мощностей узлов приведены в таблице 2.

В таблице 3 даны результаты оптимального покрытия нагрузки энергосистемы с учетом ограничений по потокам мощностей в контролируемых линиях электропередачи и располагаемым мощностям расчетных ТЭС генетическим алгоритмом.

Таблица 1.

### Характеристики относительных приростов расхода условного топлива в ТЭС

ТЭС-0 $B_{00} = 114 \text{ т.у.т./ч.}$		ТЭС-1 $B_{10} = 32 \text{ т.у.т./ч.}$		ТЭС-6 $B_{60} = 114,8 \text{ т.у.т./ч.}$		ТЭС-7 $B_{70} = 97 \text{ т.у.т./ч.}$	
$P_0$ МВт	$b_0$ т.у.т./МВт .ч.	$P_1$ МВт	$b_1$ т.у.т./МВт .ч.	$P_6$ МВт	$b_6$ т.у.т./МВт. ч	$P_7$ МВт	$b_7$ т.у.т./МВт.ч.
320	0,316	70	0,34	400	0,2705	320	0,22
384	0,317	77	0,359	565	0,2836	398	0,27
427	0,319	92	0,366	583	0,2967	438	0,295
428	0,334	92	0,524	595	0,310	450	0,32
640	0,3341	100	0,533	647	0,323	495	0,345
				715	0,336	502	0,395

Таблица 2

### Коэффициенты распределения мощностей узлов по контролируемым линиям электропередачи

Линии	Узлы						
	1	2	3	4	5	6	7
6-3	0,2536	-0,0713	-0,1720	0,4106	0,4890	0,6343	0,4986
6-5	-0,0701	0,02025	0,0484	-0,2810	-0,4223	0,1029	-0,2986
0-3	-0,1400	-0,1735	-0,2670	-0,1744	-0,1917	-0,2240	-0,1939

Таблица 3.

### Результаты оптимального покрытия нагрузки энергосистемы генетическим алгоритмом

$P_0$ , МВт	$P_1$ , МВт	$P_6$ , МВт	$P_7$ , МВт	$P_{6-3}$ , МВт	$P_{6-5}$ , МВт	$P_{0-3}$ , МВт	$B$ , т.у.т./ч.
325,33	92,00	787,87	494,80	574,99	157,09	74,98	535.11

Для оценки эффективности генетического алгоритма оптимизации режима энергосистемы рассматриваемая задача решена также классическим методом покоординатного спуска. При этом получено такое же решение, что в таблице 3. Вычислительные качества генетического алгоритма оптимизации исследованы также на примере оптимального покрытия суточного графика нагрузки энергосистемы, содержащей в своем составе расчетные ТЭС и ГЭС. Результаты показали высокую эффективность данного алгоритма.

#### Заключение:

1) генетические алгоритмы оптимизации могут быть эффективно использованы для решения задач оптимального планирования краткосрочных режимов электроэнергетических систем;  
2) приведенные в работе способы и методы учета ограничений при использовании генетического алгоритма открывают новые возможности для создания эффективных методов и алгоритмов комплексной оптимизации режимов электроэнергетических систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Yuryevich, K. P. Wong, Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm./ IEEE Transaction on power Systems. Vol. 14, No. 4, November 1999.

2. Манусов В.З., Павлюченко Д.А. Эволюционный алгоритм оптимизации режимов электроэнергетических систем по активной мощности. *Электричество*. - №3. 2004. – С.2-8.
3. Гайилов Т.Ш. Оптимизация режимов энергосистем генетическими алгоритмами. // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2017. – № 1,2. – С. 43-48.
4. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. / Под общей ред. Ю.Н.Руденко и В.А. Семенова – М.: Изд. МЭИ, 2000.
5. Гайилов Т.Ш. Методы и алгоритмы оптимизации режимов электроэнергетических систем. – Т.: Изд. ТашГТУ, 2014.
6. Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х. Установившиеся режимы электроэнергетических систем и их оптимизация. – Т.: «Молия», 1999.
7. Tulkin Gayibov, Behzod Pulatov. Taking into account the constraints in power system mode optimization by genetic algorithms. *E3S Web of Conferences* 264, 04045 (2021). CONMECHYDRO-2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404045>.
8. Саъдуллаев, А.Б., Умиров, А.П. and Бобакулов, Ф.А.У., 2019. Влияние концентрации нанокластеров примесных атомов марганца на параметры автоколебания тока. *European science*, (6 (48)), pp.6-10.
9. Саъдуллаев, А.Б. and Курбонов, Н.А., 2017. Влияние концентрации электроактивных атомов марганца на гальваномангнитные свойства кремния в условиях сильной компенсации. *Наука, техника и образование*, (3 (33)), pp.14-16.
10. Саъдуллаев, А.Б. and Умиров, А.П., 2018. Высокочувствительные датчики магнитного поля на основе сильно компенсированного кремния, работающие при наличии фоновой освещённости. *Universum: технические науки*, (4 (49)), pp.7-7.
11. Саъдуллаев, А.Б., Мулканов, Р.В.Ў., Умиров, А.П. and Бобакулов, З.А.Ў., 2022. Влияние концентрации электроактивных компенсирующих примесей марганца на температурную область существования автоколебания тока типа температурно-электрической неустойчивости (ТЭН). *Universum: технические науки*, (8-3 (101)), pp.5-8.
12. Саъдуллаев, А.Б. and Умиров, А.П., 2018. Высокочувствительные датчики магнитного поля на основе сильно компенсированного кремния, работающие при наличии фоновой освещённости. *Universum: технические науки*, (4 (49)), pp.7-7.
13. Уришев, Б.У., Бейтуллаева, Р.Х., Умиров, А.П., Джумаева, С.Х., Нашвандов, А.А., Тоштурдиев, Ш.Ж., 2019. Оценка энергоэффективности использования насосных станций. In *Colloquium-journal* (No. 24-1, pp. 32-33). Голопристанський міськрайонний центр зайнятості= Голопристанский районный центр занятости.
14. Файзиев, М.М., Имомназаров, А.Б., Ибрагимов, И.И., Раджабов, М.К., 2022. Стабилизатор тока. *Наука, техника и образование*, (1 (84)), pp.38-42.