

УДК 621.316.727

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТОХАСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Канд. техн. наук, доц. **Влацкая Л.А.**Д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф. **Семенова Н.Г.**
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Аннотация. В статье рассмотрена задача выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств в узлах электрической сети по критерию минимальных потерь активной мощности. Решение задачи осуществлено такими стохастическими методами как: метод Монте-Карло и генетический алгоритм. Представлены: математическая модель оптимизационной задачи, разработанные алгоритмы и блок-схемы стохастических методов. Приведены результаты сравнительного анализа работы программ, реализованных на базе стохастических методов и метода полного перебора.

Ключевые слова: Выбор мощности компенсирующих устройств, метод полного перебора, метод Монте-Карло, генетический алгоритм

Выбор мощности компенсирующих устройств (КУ) в узлах электрической сети является задачей дискретного программирования, поскольку регулирование генерируемой КУ реактивной мощности осуществляется ступенчато [1]. Точное решение такой задачи можно найти за конечное число итераций, используя только метод полного перебора. Однако, когда множество допустимых решений состоит из очень большого числа вариантов (например, разветвленная электрическая сеть с большим числом узлов и широким диапазоном варьирования мощностей КУ) поиск решения методом полного перебора неэффективен, т.к. может затянуться на длительное время. Альтернативными методами решения являются стохастические методы, к которым, в том числе, относятся метод Монте-Карло и генетический алгоритм [2].

В соответствии с вышеизложенным, актуальной задачей для электрических сетей является разработка эффективных алгоритмов выбора мощности компенсирующих устройств.

Цель работы: программная реализация алгоритмов выбора мощности КУ в дискретных переменных для проведения вычислительных экспериментов (моделирования) с целью оценки их эффективности.



В статье представлен сравнительный анализ перечисленных методов на примере решения следующей оптимизационной задачи. Необходимо осуществить выбор мощности компенсирующих устройств по критерию минимальных потерь активной мощности:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i + P_{KV_i})^2 + (Q_i - Q_{KV_i})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

с учетом ограничения по реактивной мощности, подлежащей компенсации:

$$\sum_{i=1}^n Q_{KV_i} \leq Q_{K\Sigma}, \quad (2)$$

и дискретности изменения мощности КУ:

$$Q_{KV_i} \geq 0, \quad Q_{KV_i} - \text{дискретные значения}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где n – число узлов сети; P_i , Q_i – активная и реактивная нагрузки в i -ом узле; P_{KV_i} , Q_{KV_i} – активная и реактивная мощности КУ, размещенного в i -ом узле; U – напряжение сети; R_i – активное сопротивление i -ой линии; $Q_{K\Sigma}$ – суммарная реактивная мощность, подлежащая компенсации.

Кратко рассмотрим сущность каждого из методов для решения поставленной оптимизационной задачи.

Метод полного перебора (МПП) – единственный метод с доказуемой результативностью [3]. Заключается в формировании множества

$$Q_{KV} \{Q_{kv_1}^N, \dots, Q_{kv_n}^N\}$$

из всех N допустимых решений с учетом дискретности изменения мощности КУ и выполнения ограничения (2); последующей оценкой решения на каждой k -ой итерации

$$(\Delta P(Q_{KV}^k) < P)$$

и выбором наилучшего варианта (Q_{KV}) с минимальными потерями активной мощности, определенными по выражению (1).

Блок-схема алгоритма метода полного перебора представлена на рис. 1.



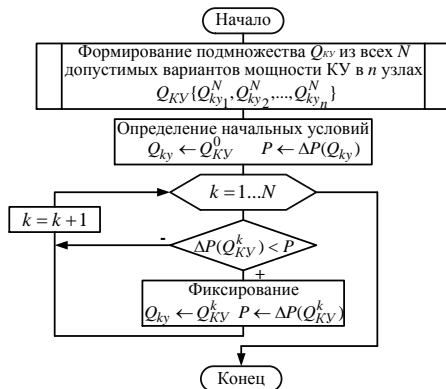


Рис. 1. Блок-схема алгоритма метода полного перебора

Метод Монте-Карло (ММК) – это ненаправленный случайный поиск оптимального решения [4]. Базируется на: генерации случайных чисел, посредством которой формируется конечное множество из N дискретных значений мощности КУ^А

$$Q_{KV} \{Q_{ky_1}^N, \dots, Q_{ky_n}^N\};$$

выборе допустимого подмножества с учетом ограничения (2) по суммарной устанавливаемой мощности КУ:

$$Q_K \{Q_{ky_1}^M, \dots, Q_{ky_n}^M\}, Q_K \subset Q_{KV};$$

фиксировании наилучшего варианта на k -ой итерации в зависимости от значения потерь активной мощности, определенных в соответствии с выражением (1)

$$\text{(если } \Delta P(Q_{KV}^k) < P, \text{ то } Q_{ky} \leftarrow Q_K^k, P \leftarrow \Delta P(Q_K^k)).$$

Более подробно процедуры алгоритма метода Монте-Карло описаны в работе [5].

Блок-схема алгоритма метода Монте-Карло приведена на рис. 2.

Генетический алгоритм (ГА) – целенаправленный стохастический метод поиска решения [6]. Алгоритм аналогичен естественной эволюции в природе и основывается на селекции, скрещивании, наследовании и мутации. Он реализуют «выживание сильнейших», что выражается в создании «потомков» поколений решений более приспособленных (оптимальных), чем «предки» (предыдущее поколение решений). Итерационный процесс поиска решения продолжается до тех пор, пока поколения не перестанут существенно отличаться друг от

друга, или не пройдет заданное количество поколений (эпох) или заданное время поиска. Подробно процедуры генетического алгоритма описаны в работе [7].

Блок схема генетического алгоритма представлена на рис. 3.

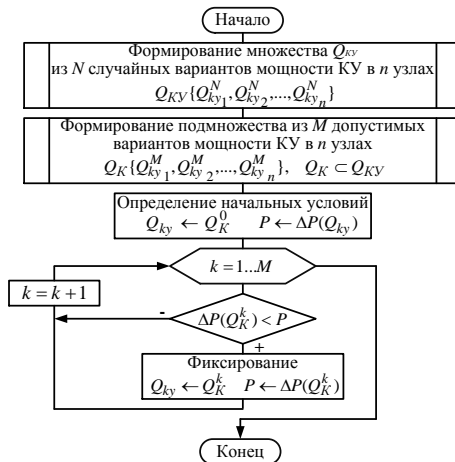


Рис. 2. Блок схема алгоритма метода Монте-Карло

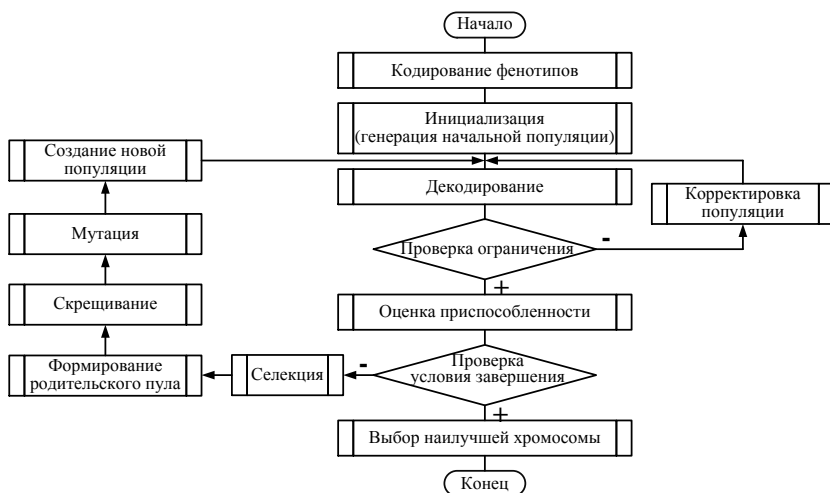


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма

В соответствии с приведенными блок-схемами алгоритмов выбора мощности КУ разработаны и зарегистрированы в УФЭР ОГУ три прикладные программы.

Проведено моделирование и осуществлена оценка эффективности работы программ на различных наборах входных данных. Исследовались 3-х, 5-и и 7-и узловые схемы различной конфигурации (радиальные, магистральные, смешанные). Шаг изменения мощности КУ (h) варьировался от 50 квар до 300 квар. Реактивная мощность, подлежащая компенсации оставалась неизменной и составляла $Q_{к\kappa} = 1250$ квар. Моделирование проводилось с различными параметрами алгоритмов: количество сгенерированных случайных вариантов мощностей КУ (N) в методе Монте-Карло и количество эпох (k_{ep}) в генетическом алгоритме (количество особей в популяции принято равным 5 и не менялось в процессе моделирования).

Характеристики компьютера, на котором выполнялось моделирование: процессор Intel Core 2 Duo 1.80 GHz, оперативная память 4 Гб, тип системы – 64-разрядная операционная система Windows 7.

Адекватность разработанных программ, реализующих метод Монте-Карло и генетический алгоритм, оценивалась посредством сравнения результатов их работы с результатами программы, реализующей метод полного перебора по двум показателям:

- 1) относительная погрешность (ε) полученных потерь активной мощности;
- 2) быстродействие (t) – время, необходимое программе для вывода результатов.

Отдельные результаты сравнения работы программ приведены в табл. 1.

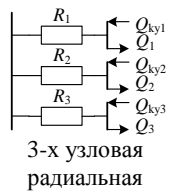
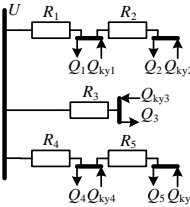
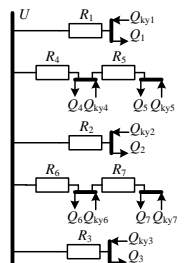
Для ММК и ГА проводилось по 50 прогонов программы, в табл. 1 приведены только максимальные и минимальные значения ΔP . Погрешность вычислений (ε) и быстродействие (t) по ММК и ГА определялись как среднее арифметическое.

Дальнейшие исследования планируется направить на определение оптимальных параметров алгоритмов для решения задачи выбора мощности КУ с приемлемыми точностью и быстродействием, таких как: соотношение шага изменения мощности КУ (h) и суммарной реактивной мощности, подлежащей компенсации ($Q_{к\kappa}$); количество генерируемых вариантов (N) в ММК; количество эпох (k_{ep}) и количество особей в популяции (k_{pop}) в ГА.



Таблица 1

Результаты сравнения алгоритмов

Схема	Метод	h , квар	Парам-ры алгоритма	ΔP , кВт	ε , %	t , с	
 <p>3-х узловая радиальная</p>	МПП	50		422,269		$\approx 28,6$ с	
	ММК	50	$N = 1 \cdot 10^3$	422,269 ...	0,3	$\approx 0,16$ с	
			$N = 3 \cdot 10^3$	422,269			
	ГА	50	$k_{ep} = 20$		422,269 ...	0,1	$\approx 0,12$ с
					422,873		
			$k_{ep} = 50$		422,269 ...	0,05	$\approx 0,24$ с
					422,737		
	 <p>5-и узловая смешанная</p>	МПП	100		2921,12		≈ 1 ч 38мин 12с
		ММК	100	$N = 3 \cdot 10^3$	2989,93	1,4	$\approx 2,14$ с
					2921,12 ...		
ГА		300	$N = 3 \cdot 10^3$	2989,93	0	$\approx 1,83$ с	
				2986,62			
ММК		300	$N = 3 \cdot 10^3$	$k_{ep} = 50$	2921,12 ...	3,5	$\approx 0,44$ с
					3101,78		
				$k_{ep} = 50$	2989,93 ...	0,7	$\approx 0,35$ с
					2952,57		
 <p>7-и узловая смешанная</p>		МПП	300		1042,84		≈ 1 ч 49мин 57с
	ММК	300	$N = 1 \cdot 10^3$	1042,84 ...	2,9	$\approx 0,33$ с	
				1154,35			
			$N = 3 \cdot 10^3$	1042,84 ...	1,6	$\approx 2,6$ с	
				1069,32			
	ГА	300	$k_{ep} = 20$	1042,84 ...	1,4	$\approx 0,25$ с	
				1058,19			
			$k_{ep} = 50$	1042,84 ...	0,8	$\approx 0,56$ с	
				1051,67			



Выводы по работе:

1. Метод полного перебора – единственный точный метод, однако для сложных схем его применение при выборе мощности КУ неэффективно в виду очень низкого быстродействия.

2. Быстродействие и точность метода Монте-Карло зависит от отношения суммарной реактивной мощности, подлежащей компенсации ($Q_{КС}$) к шагу изменения мощности КУ (h) и числа случайно сгенерированных вариантов (N). Чем меньше значение $Q_{КС}/h$, тем меньше можно задать N , что соответственно приведет к повышению быстродействия программы с приемлемой точностью ($\varepsilon = 0...5\%$).

3. Генетический алгоритм является наиболее эффективным из рассмотренных методов, т.к. превосходит по быстродействию метод полного перебора и метод Монте-Карло и позволяет найти решение с приемлемой погрешностью за время, не превышающее время поиска ММК.

Библиографический список

1. **Ковалев И. Н.** Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 200 с. (ЭТЭ. Экономия топлива и электроэнергии).

2. **Газизов Т.Т.** Методы глобальной оптимизации: уч. пос. Томск: В-Спектр, 2017. 23 с.

3. Метод полного перебора. [Электронный ресурс]. URL: <https://chem21.info/info/1463896/> (дата обращения 29.09.2020).

4. **Карпенко А.П.** Метод Монте-Карло. [Электронный ресурс] // Методы оптимизации (базовый курс). URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/ch1003.mod/?cou=MO/base.cou> (дата обращения 29.09.2020)

5. **Влацкая Л. А., Семенова Н.Г.** Программная реализация метода Монте-Карло для оптимального размещения компенсирующих устройств // Энергетические системы: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород: БГТУ, 2019. С. 88-94. [eLIBRARY ID: [43933504](#)]

6. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с. [eLIBRARY ID: [21556269](#)]

7. **Влацкая Л. А., Семенова Н.Г.** Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 21-28. [eLIBRARY ID: [41568402](#)]



STOCHASTIC ALGORITHMS COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER SELECTION FOR COMPENSATING DEVICE IN ELECTRIC NETWORK NODES

L.A. Vlatskaya and N.G. Semenova

Orenburg State University, Orenburg

Abstract. The article has analyzed the problem of compensating the device's optimal power selection for electric network nodes with respect to the criterion of minimal losses of active power. The solution to this problem is carried out by using stochastic methods such as the Monte Carlo method and genetic algorithm. The paper presents: a mathematical model of an optimization problem, developed algorithms, and flow diagrams of stochastic methods. It has presented the results of comparative analysis of programs operation the realization of which is based on the stochastic methods and method of full enumeration.

Keywords: power selection of compensating devices, method of full enumeration, Monte Carlo method, genetic algorithm.

