

УДК: 621.311

DOI: 10.65599/ENG3129

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСА

¹З.Х. Хабибуллозода, ²Ш.Дж. Джуразода, ¹С.Т. Исмоилов, ¹М.К. Джаборов

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Филиал Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Душанбе, Таджикистан

Статья посвящена актуальной задаче оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях с нелинейной нагрузкой. При оптимизации особое внимание уделено минимизации рисков возникновения гармонического резонанса при установке компенсирующих устройств. Представлен комплексный подход для расчета прогнозируемого коэффициента возникновения резонанса с использованием метаэвристических алгоритмов. На примере южной части энергосистемы Таджикистана проведено сравнительное исследование эффективности трех алгоритмов: метода роя частиц, метода серых волков и метода роя сальп. Результаты моделирования подтвердили преимущество алгоритма метода роя сальп, который обеспечил стабильную сходимость к глобальному оптимуму, позволив снизить потери мощности на 16,9 % и нормализовал уровни напряжения в узлах исследуемой схемы до 99,1 % от номинального напряжения и при этом строго соблюдал ограничения по возможности возникновения резонанса.

Ключевые слова: метаэвристические алгоритмы, компенсирующее устройство, метод роя сальп, резонанс, потери мощности, напряжение.

ТАТБИҚИ АЛГОРИТМҲОИ МЕТАЭВРИСТИКӢ БАРОИ ОПТИМИЗАТСИЯИ БИСӢРМЕӢӢРИИ ҶОЙГИРКУНИИ ДАСТГОҲҲОИ ҶУБРОНКУНАНДА БО НАЗАРДОШТИ ХАВҲҲОИ БА ВУҶУД ОМАДАНИ РЕЗОНАНС

¹З.Ҳ. Ҳабибуллозода, ²Ш.Ҷ. Ҷӯразода, ¹С.Т. Исмоилов, ¹М.К. Ҷаборова

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Филиали Донишгоҳи миллии таҳқиқотии «Донишқадаи энергетикии Москва» дар шаҳри Душанбе, Тоҷикистон

Мақола ба масъалаи муҳими оптимизатсияи ҷойгиркунии дастгоҳҳои ҷубронкунанда дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ бахшида шудааст. Ҳангоми оптимизатсия диққати махсус ба кам намудани хавфҳои ба вучуд омадани резонанси гармоникӣ ҳангоми насби дастгоҳҳои ҷубронкунанда дода шудааст. Равиши ҳамаҷониба барои ҳисоби зарифи пешгӯикунии пайдоиши резонанс бо истифода аз алгоритмҳои метаэвристикӣ пешниҳод шудааст. Дар мисоли қисми ҷанубии системаи электроэнергетикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон тадқиқоти муқоисавӣ самаранокии се алгоритм: усули тӯдаи зарраҳо, усули гурӯҳҳои хокистарӣ ва усули тӯдаи сальпҳо гузаронида шуд. Натиҷаҳои моделсозӣ бартариии алгоритми усули тӯдаи сальпҳо тасдиқ карданд, ки наздикшавии устуворро таъмин намуда, имкон дод, ки талафоти тавоноӣ 16,9 % кам карда шавад ва сатҳи шиддат дар гиреҳҳои нақшаи тадқиқшаванда то 99,1 % аз шиддати номиналӣ баланд бароварда шавад. Дар ин сурат маҳдудиятҳо вобаста ба эҳтимоли ба вучуд омадани резонанс қатъиян риоя карда шуданд.

Калидвожаҳо: алгоритмҳои метаэвристикӣ, дастгоҳи ҷубронкунанда, усули тӯдаи сальпҳо, резонанс, талафоти тавоноӣ, шиддат.

APPLICATION OF METAHEURISTIC ALGORITHMS FOR MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF COMPENSATING DEVICE PLACEMENT CONSIDERING RESONANCE RISKS

¹Z.H. Habibullozoda, ²Sh.J. Jurazoda, ¹S.T. Ismoilov, ¹M.K. Jaborov

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Dushanbe Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Dushanbe, Tajikistan

The article is devoted to the topical task of optimizing the placement of compensating devices in electrical networks with non-linear loads. During the optimization, special attention is paid to minimizing the risks of harmonic resonance when installing compensating devices. A comprehensive approach is presented, integrating the calculation of the predicted resonance occurrence coefficient into the iterative process of metaheuristic search. Using the southern part of the Tajikistan power system as an example, a comparative study of the effectiveness of three algorithms was conducted: Particle Swarm Optimization, Grey Wolf Optimizer, and Salp Swarm Algorithm. The simulation results confirmed the advantage of the Salp Swarm Algorithm, which ensured stable convergence to the global optimum, allowing for a 16,9 % reduction in power losses and normalizing the voltage levels at the nodes of the studied circuit to 99,1 % of the nominal voltage. At the same time, constraints regarding the possibility of resonance were strictly observed.

Keywords: metaheuristic algorithms, compensating device, salp swarm algorithm, resonance, power losses, voltage.

Введение

Масштабные внедрения электроприёмников с нелинейной вольтамперной характеристикой (далее «нелинейная нагрузка») в электрические сети приводят к существенному изменению электромагнитной среды электроэнергетической системы (ЭЭС). Как известно, такие электроприёмники являются источником высших гармонических составляющих тока (ВГСТ) и приводят к появлению высших гармонических составляющих напряжения (ВГСН), которые отрицательно влияют на работу основного электрооборудования и других электроприёмников с линейной вольтамперной характеристикой.

С другой стороны, в электрических сетях функционирует множество элементов, содержащих индуктивное сопротивление (трансформаторы, линии электропередачи, реакторы и другие) и ёмкостную проводимость (ёмкость между фазными проводами и земля, батарей статических конденсаторов и другие), которые как обычно соединены параллельно. В соответствии с теорией резонанса понятно, что в электрических сетях при параллельном включении RLC – элементов возникает резонанс токов [1]. Для поиска частоты, в которой возникает резонанс, необходимо построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) исследуемой сети. АЧХ даёт возможность наблюдать, на какой частоте есть возможность возникновения резонанса. При наличии ВГСТ в сети и, если частота тока высших частот соответствует с частотой резонанса (или близка к резонансной частоте), увеличение величины ВГСН неизбежно и в большинстве случаев величина ВГСН превышает допустимое значение нормативного документа [2]. Поэтому в резонансных режимах величина ВГСТ и ВГСН достигает максимумов, многократно превышающих нормативные требования, что приводит к перенапряжениям (особенно на высших частот), перегреву токоведущих частей электрооборудования и, в конечном итоге, к выходу из строя оборудования. Для правильной оценки таких режимов была разработана и апробирована методика прогнозирования вероятности возникновения резонанса [3-4, 16]. Внедрение прогнозируемого коэффициента возникновения резонанса (ПКВР) позволило сопоставлять расчетные значения узловых сопротивлений на различных частотах с их допустимыми пределами и определить наиболее уязвимые узлы системы к возникновению резонанса.

Постановка задачи

Определение рисков возникновения резонанса является лишь первым этапом обеспечения надежности электроснабжения потребителей. В электрических сетях имеются узлы, в которых величина напряжения находится ниже допустимого значения нормативного документа [2] или требуемого условия работы электроприёмников, поэтому для обеспечения качества электроэнергии (КЭЭ) и снижения потерь мощности, как правило, используются компенсирующие устройства (КУ), часто именно батарей статических конденсаторов (БСК). Задача выбора мощности и места размещения БСК в распределительных сетях становится многокритериальной, так как следует одновременно минимизировать потери активной мощности (ΔP), поддерживать уровни напряжения в заданных пределах в соответствии с нормативными документами, а также избежать возможности возникновения резонанса на частотах существующих гармоник.

Существующие оптимизационные методы часто оказываются неэффективными при решении подобных задач из-за высокой размерности и нелинейности параметров электрических сетей. В настоящее время широко применяются метаэвристические оптимизационные методы, которые обладают высокой эффективностью при поиске глобального оптимума в сложных многомерных пространствах [5 – 7].

Настоящая работа посвящена развитию комплексного подхода к оптимизации мест установки и мощности КУ в электрических сетях, содержащей нелинейную нагрузку с учётом возможности возникновения резонансных явлений. Основное отличие метода рассматриваемой данной работы заключается в том, что с помощью ранее полученных результатов по оценке прогнозируемого коэффициента возникновения резонанса (ПКВР) в характерных узлах электрических сетей, содержащих нелинейные нагрузки, определяются наилучшие места установки КУ с учётом снижения потерь мощности, поддержания уровня напряжения в узлах в соответствии с [2] и вероятности

возникновения резонанса. При расчёте используются метаэвристические оптимизационные методы, такие как метод роя частиц (МРЧ), метод серых волков (МСВ) и метод роя сальп (МРС).

Объектом исследования является южная часть ЭЭС Республики Таджикистан (РТ). Граф объекта исследования приведен на рисунке 1. Исходные данные исследуемой схемы приведены в таблице 1. Исследуемая схема состоит из 9 источников (электрические станции), 4 понизительных подстанций, 20 узлов нагрузки, а также 46 воздушных линий электропередачи (ЛЭП), из которых 4 линии напряжением 500 кВ и 42 линии напряжением 220 кВ. В исследуемой схеме в узле 14 подключен мощный источник ВГСТ (Таджикская алюминиевая компания (ТАЛКО)), который генерирует ВГСТ порядка $6 \cdot n \pm 1$ (5-я, 7-я, 11-я, 13-я и т.д.). Данная нагрузка оказывает прямое влияние на спектральный состав напряжений в узлах 500 кВ и 220 кВ, создавая предпосылки для гармонического резонанса.

Современные ЭЭС содержат множество узлов и ветвей. В таких случаях целесообразно использовать матричный вид описания режимов работы электрических сетей с применением теории графов. Поэтому коротко приводим в матричном виде описание электрических сетей и теории графов.

Матричный вид описания уравнений состояния электрической сети

Конфигурацию схемы замещения ЭЭС можно отобразить в виде графа. Подробно теория графов приведена в [8]. Для произвольного графа электрической сети возможно определить матрицу соединения ветвей в узлах (M_Σ) и матрицу соединений ветвей в независимых контурах (N), служащих для обобщенного аналитического представления графа [8, 9].

Приведём краткие сведения для составления перечисленных матриц независимо от сложности конфигурации электрических сетей. Матрица соединений ветвей в узлах – это прямоугольная матрица, число строк которой должно быть равно числу вершин графа n , а число столбцов – числу рёбер m . Она обозначается следующим образом:

$$M_\Sigma = (m_{ij}), \quad i=1, 2, \dots, n; \quad j=1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

При этом номера строк i соответствуют номерам вершин, а номера столбцов j – номерам рёбер. Элементы матрицы M_Σ могут принимать одно из трех значений: $m_{ij} = +1$, если узел i является начальной вершиной ветви j ; $m_{ij} = -1$, если узел i является конечной вершиной ветви j ; $m_{ij} = 0$, если узел i не является вершиной ветви j .

Каждая строка матрицы M_Σ показывает, какими вершинами соответствующие ветви присоединяются к данному узлу схемы; а каждый столбец – какие узлы являются начальной и конечной вершинами данной ветви, то есть в каждом столбце матрицы M_Σ будут только одна положительная и одна отрицательная единицы, а остальными элементами являются нули. Поэтому, если умножаем матрицу M_Σ на строковую единичную матрицу (n_t), получаем нулевую (строчную) матрицу, то есть:

$$n_t \cdot M_\Sigma = 0, \quad (2)$$

Таблица 1- Основные параметры исследуемой электрической схемы
Table 1 – Main Parameters of the Studied Electrical Circuit

Узлы	$U_{\text{ном}}$, кВ	Тип	P_n , МВт	$\cos \phi_n$	Ветви	$U_{\text{ном}}$, кВ	L_d , км	n_c	Марка провода
1	500	И	1995	0,85	2-3	500	50	1	АС-300
2	500	-	-	-	3-4	500	204	1	АС-300
3	500	-	-	-	3-5	500	95	2	АС-300
4	500	Н	800	0,93	13-14	220	5,6	8	АС-300
5	500	И	800	0,85	13-15	220	5,6	2	АСО-300
6	220	И	1005	0,85	13-12	220	47,5	1	АСО-300
7	220	-	-	-	9-10	220	45,5	1	АСО-300
8	220	Н	150	0,9	10-16	220	28	1	АС-300
9	220	-	-	-	9-12	220	10,9	2	АС-400
10	220	Н	125	0,92	9-11	220	8,3	2	АС-400

Окончание таблицы 1

11	220	И	400	0,85	9-8	220	26,5	1	АС-300
12	220	Н	250	0,91	8-34	220	32,2	1	АСО-300
13	220	-	-	-	34-35	220	50,2	1	АСО-300
14	220	Н	1100	0,92	35-21	220	0,7	1	АСУ-300
15	220	Н	350	0,92	21-36	220	0,5	1	АСО-300
16	220	Н	300	0,92	36-18	220	44,7	1	АС-300
17	220	Н	12	0,88	36-6	220	2,9	1	АСУ-300
18	220	И	120	0,85	6-35	220	2,5	1	АСО-300
19	220	И	600	0,85	6-37	220	66,5	1	АС-300
20	220	Н	40	0,91	6-22	220	22,1	1	АС-300
21	220	Н	64	0,92	6-24	220	33,4	1	АСО-300
22	220	Н	41	0,9	22-23	220	23,1	1	АС-400
23	220	Н	200	0,92	23-26	220	15,9	1	АС-400
24	220	Н	20	0,92	7-37	220	8	2	АС-400
25	220	Н	140	0,92	16-18	220	28,3	1	АСО-300
26	220	И	670	0,85	16-19	220	53,4	1	АС-400
27	220	И	220	0,85	34-17	220	0,3	1	АС-300
28	220	И	248	0,85	20-38	220	6	1	АС-300
29	220	Н	201	0,94	38-19	220	10	1	АС-300
30	220	Н	130	0,93	18-35	220	44,7	1	АС-300
31	220	Н	170	0,91	19-25	220	34,3	1	АС-300
32	220	Н	75	0,92	19-36	220	10	1	АС-300
33	220	Н	180	0,93	20-36	220	2,5	1	АС-300
34	220	-	-	-	24-25	220	8,9	1	АС-300
35	220	-	-	-	25-26	220	33,4	2	АС-400
36	220	-	-	-	25-29	220	56,4	2	АС-400
37	220	Н	163	0,92	26-33	220	93	2	АС-400
38	220	-	-	-	26-27	220	13,3	1	АС-400
Трансформаторы (автотрансформаторы)					27-28	220	14,3	1	АС-400
Ветви	$U_{ном}$, кВ	$S_{нз}$, МВА		n_T	28-38	220	58,4	1	АСО-300
1-6	500/220	3×167		2	28-30	220	20,6	1	АС-400
2-13	500/220	3×267		3	28-32	220	49	1	АС-300
3-9	500/220	3×167		1	30-31	220	75,8	1	АС-300
5-7	500/220	3×167		2	31-33	220	77	1	АС-400
Линии электропередачи					32-33	220	29,9	1	АС-240
Ветви	$U_{ном}$, кВ	$L_{лз}$, км	$n_{ц}$	Марка пр.					
1-2	500	115	2	3×АС-400					

Примечание: Н – нагрузка; И – источник; $U_{ном}$ – номинальное напряжение; P_n – номинальная активная мощность; $\cos\varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности; S_n – номинальная полная мощность; n_m – количество трансформаторов; L_d – длина линии электропередачи; $n_{ц}$ – количество цепей линии.

При расчётах режимов работы сети обычно расчёт производится относительно одного узла – базисного узла, поэтому матрицу M_Σ можно разделить на две части матрицы M_B и M . С учётом разделения матрицы M_Σ на две составляющие уравнение (5) принимает следующий вид:

$$[n_t] \times \begin{bmatrix} M \\ M_B \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

или:

$$M_B = -n_t \cdot M. \quad (4)$$

где: M – матрица соединений для схемы без балансирующего узла; M_B – матрица соединений для балансирующего узла.

Для практических расчетов достаточно пользоваться матрицей M , которая полностью характеризует конфигурацию электрической сети.

Матрица соединений ветвей в независимые контуры – это прямоугольная матрица, число строк которой равно числу независимых контуров графа k , а число столбцов – числу ветвей m . Она обозначается следующим образом:

$$N = (n_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

При этом номера строк i соответствуют номерам независимых контуров, а номера столбцов j – номерам ветвей. Элементы матрицы N определяются следующим образом: $n_{ij} = +1$, если ветвь j входит в контур i и направление ветви совпадает с направлением обхода контура; $n_{ij} = -1$, если ветвь j входит в контур i , а направление ветви и обхода контура противоположны; $n_{ij} = 0$, если ветвь j не входит в контур i .

Правильность составленной матрицы N можно проверить с помощью следующего условия:

$$N \cdot M^T = 0 \quad (6)$$

где: M^T – транспонированная матрица M .

При расчетах режимов электрических сетей применяются следующие основные матрицы схем замещения [9]:

Диагональная матрица сопротивлений ветвей:

$$Z_B = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & z_m \end{bmatrix}. \quad (7)$$

где: m – количество ветвей схемы.

Диагональная матрица проводимостей ветвей:

$$Y = Z_B^{-1} = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1/z_m \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3. Матрица узловых проводимостей:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{12} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{1n} & y_{2n} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

где: i – я строка соответствует i – му узлу, j – й столбец – j – му узлу, а число строк и столбцов равно числу узлов схемы n . На главной диагонали располагаются собственные узловые проводимости, для которых $i = j$ и каждая из которых равна сумме проводимостей ветвей, соединенных с данным узлом (y_{ii}). Остальные элементы (для которых $i \neq j$) являются взаимными узловыми проводимостями (y_{ij}).

Матрицу узловых проводимостей также можно определить с помощью следующего выражения:

$$Y = M \cdot Y_B \cdot M^T. \quad (10)$$

Матрица узловых сопротивлений определяется путём определения обратной матрицы узловых проводимостей:

$$Z = Y^{-1}. \quad (11)$$

Приведённые формулы (1) – (11) могут быть использованы для составления матрицы, как и для основной частоты, так и для высших частот.

Матрицы M и N дают возможность записать уравнения состояния электрической цепи в матричной форме. Система взаимно независимых уравнений первого закона Кирхгофа может быть представлена в виде [9]:

$$M \cdot \dot{I} = \dot{J}, \quad (12)$$

где: $\dot{I} = (\dot{I}_i)$, $i = 1, \dots, m$; $\dot{J} = (\dot{J}_i)$, $i = 1, \dots, n-1$ – соответственно столбцы токов в ветвях и задающих токов в узлах.

Аналогичным образом определяем систему взаимно независимых уравнений напряжений второго закона Кирхгофа:

$$N \cdot \dot{U}_B = 0, \quad (13)$$

где: $\dot{U}_B = (\dot{U}_{Bi})$, $i = 1, \dots, m$ – столбец падений напряжений на ветвях сети.

Используя закон Ома в ветвях схемы замещения ($U_B = Z_B \cdot I$), запишем уравнение (12) в следующем виде:

$$N \cdot (Z_B \cdot \dot{I}) = 0, \quad (14)$$

Объединяя матричные уравнения (12) и (14) в общую систему, получим обобщенное уравнение состояния электрической сети независимо от её конфигурации и числа элементов:

$$\begin{cases} M \cdot \dot{I} = \dot{J}; \\ N \cdot Z_B \cdot \dot{I} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, получаем обобщенное уравнение состояния электрической сети в матричном виде:

$$A \cdot \dot{I} = \dot{F}. \quad (16)$$

где: $A = \begin{bmatrix} M \\ N \cdot Z_B \end{bmatrix}$ и $\dot{F} = \begin{bmatrix} \dot{J} \\ 0 \end{bmatrix}$ матрицы, которые определяются в зависимости от исходных параметров режима и конфигурации электрической сети.

Обобщённое уравнение состояния электрической сети (16) можно записать как для основной частоты, так и для высших частот.

На основе предложенного метода прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях, содержащего нелинейную нагрузку [4], была разработана программа для ЭВМ, которая определяет вероятности возникновения резонанса в электрических сетях [10].

В качестве примера приводим результаты прогнозирования возможности возникновения резонанса в южной части ЭЭС РТ по разработанной программе, граф которого приведён на рисунке 1. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 1.

Допустимые и расчетные значения ПКВР в нормальном и послеаварийном (отключение одной цепи линии 1-2) режимах для узлов 1 – 5 приведены на [4].

На основе разработанной методики прогнозирования вероятности возникновения резонанса в электрических сетях и с целью облегчения оценки явления резонанса в сетях, отношение между узловым сопротивлением на резонансной частоте и сопротивлением на основной частоте принимаем ПКВР на гармонике порядка n [4]:

$$K_{p(n)} = \frac{Z_{y(n)}}{Z_{y(1)}} \quad (17)$$

Резонанс возникает при наличии ВГСТ, если выполняется следующее условие:

$$K_{p(n)\text{доп}} = \frac{Z_{y(n)\text{доп}}}{Z_{y(1)}} \geq K_{p(n)} \quad (18)$$

где, $Z_{y(n)\text{доп}} = U_{(n)\text{доп}}/I_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение узлового сопротивления для каждой гармоники порядка (n); $U_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение напряжения n – ой гармоники в соответствии [2]; $I_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение тока n – ой гармоники в соответствии с [11].

Если выполняется условие (18), тогда значение коэффициента n – ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$) превышает нормативное значение [2].

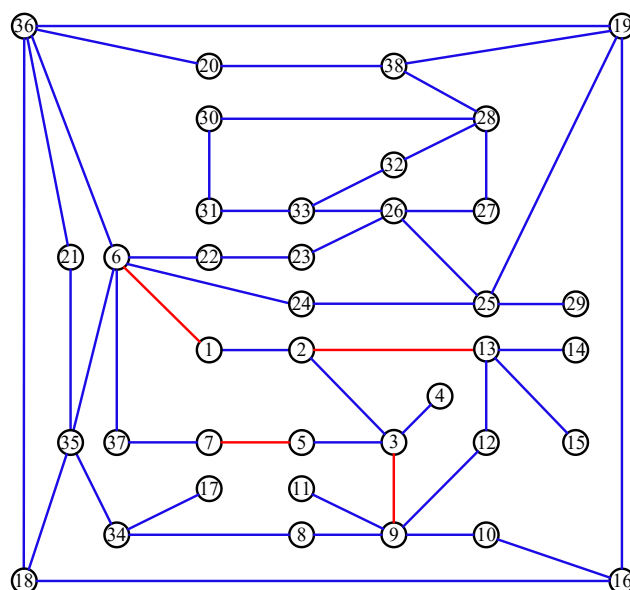


Рисунок 1 – Граф исследуемой части ЭЭС РТ

Figure 1 – Graph of the Studied Part of the Power System of the Republic of Tajikistan

Метод оптимизации для размещения КУ с учётом возможности возникновения резонанса.

Выбор метода оптимизации для размещения КУ определяется с учётом математической сложности данной задачи. В условиях современных ЭЭС данная задача является нелинейной, многокритериальной и имеет дискретно-непрерывный характер. Традиционные методы оптимизации размещения КУ обычно используются для минимизации потерь активной мощности и поддержания уровней напряжения. Если при оптимизации учитываем фактор резонанса как ограничение, структура целевой функции сильно меняется. В таком случае традиционные методы не всегда дают желаемые результаты [7]. В последние годы был разработан ряд методов и алгоритмов оптимизации для определения оптимальной мощности и места установки КУ [12 – 15]. Для снижения потерь и нормализации уровней напряжений в узлах радиальных сетей в [12] предложен двухэтапный метод, который сначала определяет приоритетные узлы с помощью коэффициентов чувствительности, а затем оптимизирует параметры батарей конденсаторов посредством гибридного алгоритма роя частиц. Эффективность данного подхода подтверждена моделированием в MATLAB на тестовых схемах IEEE, показавшим значительное улучшение уровня напряжения и уменьшения потерь мощности по сравнению с существующими методами. В работе [13] предложено использование МРЧ с использованием коэффициентов чувствительности потерь ($K_{ч.п.}$), которые используются для уменьшения области поиска основного алгоритма. Метод распространения бактерий для оптимизации места размещения КУ используется в [14]. Для определения узлов, в которых необходимо установить КУ, используется коэффициент $K_{ч.п.}$, с помощью алгоритма оптимизации муравьиной колонии определяется мощность КУ. В работе [15] представлен новый эволюционный

алгоритм для оптимизации мест размещения шунтирующих батарей конденсаторов в распределительной сети.

Таким образом, можно сделать вывод, что метаэвристические алгоритмы, такие как МРЧ (PSO), МСВ (GWO), МРС (SSA) и др. обладают рядом достоинств по сравнению с традиционными методами. В таблице 2 приведены основные преимущества метаэвристических методов по сравнению с классическими методами.

Таблица 2- Основные параметры исследуемой электрической схемы

Table 2 – Main Parameters of the Studied Electrical Circuit

Критерий сравнения	Традиционные методы	Метаэвристические методы
Поиск глобального оптимума	Часто застревают в локальных минимумах из-за нелинейности АЧХ.	Обладают механизмами выхода из локальных экстремумов (стохастический поиск).
Тип переменных	Требуют непрерывности и дифференцируемости функций.	Легко работают с дискретными (номера узлов) и целочисленными данными.
Учет резонанса	Сложно формализовать ограничения по ПКВР в аналитическом виде.	ПКВР используется напрямую как штрафная функция в алгоритме.
Чувствительность к начальной точке	Результат сильно зависит от начального приближения.	Случайная инициализация популяции обеспечивает широкое покрытие пространства поиска.

Основное отличие предлагаемого метода по сравнению с существующим методом заключается в том, что значение ПКВР, методика расчета которого подробно описана в [4], интегрируется непосредственно в итерационный процесс метаэвристического поиска. При этом в классических методах установка КУ рассматривается только для компенсации реактивной мощности на основной частоте, а метаэвристические алгоритмы позволяют проводить «частотное сканирование» каждого потенциального решения, что гарантирует, что выбранная точка установки КУ не приведет к выполнению условия возникновения резонанса (18).

Для проверки рассмотрим отличие между алгоритмами МРЧ, МСВ и МРС. Алгоритм МРЧ имитирует движение стаи птиц. Основным недостатком является высокая инерционность, из-за которой частицы часто «пролетают» мимо узких зон безопасности между резонансными пиками. Алгоритм МСВ имитирует иерархию охоты волков. Данный алгоритм лучше МРЧ, однако из-за сильного влияния трех лидеров (альфа (α), бета (β), дельта (δ)) может преждевременно сходиться, при этом игнорируя потенциально лучшие узлы сети. Алгоритм МРС является наиболее эффективным по следующим причинам: даёт высокую точность с учётом ограничений по ПКВР, наименьшая настройка параметров при расчёте и стабильная сходимость результата. Сравнение трёх рассмотренных алгоритмов приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение алгоритмов метаэвристических методов

Table 3 – Comparison of metaheuristic algorithms

Критерий	МРЧ	МСВ	МРС
Точность обхода резонанса	Низкая (высокая инерция проскакивает границы ПКВР)	Средняя (лидеры могут «затянуть» рой в зону резонанса)	Высокая (цепочечная структура плавно огибается опасные узлы)
Параметризация	Требует настройки ω , c_1 , c_2	Требует настройки α , β , δ	Минимально (только c_1)
Сходимость	Склонность к локальным минимумам в узлах	Быстрая, но часто преждевременная	Стабильная за счёт адаптивного шага к «пище»

На основе сравнительной таблицы 3 можно сделать вывод, что МРЧ часто предлагает недопустимые решения, так как его вектор скорости не учитывает резкую границу резонанса, МСВ сужает поиск вокруг лидеров, и если α -волк оказался в локально удачном, но близком к резонансу месте, вся стая застревает там, МРС, имитируя цепочку, сохраняет гибкость, даже если лидер приблизился к границе резонанса, последователи за счет усреднения позиций остаются в безопасной зоне, позволяя алгоритму исследовать соседние узлы.

Далее рассмотрим диаграмму сходимости алгоритмов оптимизации МРЧ, МСВ и МРС.

В соответствии с диаграммой сходимости алгоритмов оптимизации (рисунок 2) видно, что самым лучшим алгоритмом по сходимости является алгоритм MPC, поэтому в дальнейшем используем данный алгоритм.

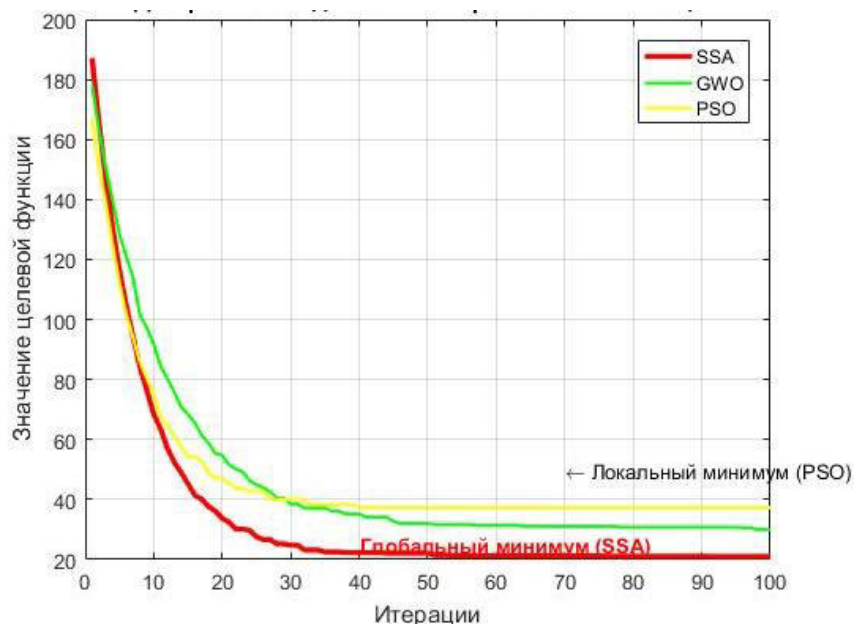


Рисунок 2- Диаграмма сходимости алгоритмов оптимизации МРЧ, МСВ и МРС
Figure 2 – Convergence curve of PSO, WOLF, and DFO optimization algorithms

Алгоритмом метода роя сальп (AMPC) (Salp Swarm Algorithm, SSA) является современный метаэвристический оптимизационный алгоритм, который впервые предложил Сейедали Мирджалил в 2017 году. Данный алгоритм имитирует социальное поведение сальп (морских беспозвоночных) во время поиска пищи в океане.

Биологическое обоснование данного алгоритма заключается в том, что сальпы образуют длинные цепи, в которых выделяют две группы особей: лидер (первая сальпа, которая направляет рой к источнику пищи) и последователи (все остальные сальпы, которые следуют друг за другом, поддерживая связность цепи). Целью данного алгоритма является нахождение глобального оптимума (источник пищи) в многомерном пространстве поиска.

Математической моделью данного алгоритма является следующее: на первом шаге задаются начальные значения, то есть количество агентов (сальп) (N), количество итераций (T), границы поиска (lb , ub) и целевая функция $f(x)$; на втором шаге создается начальная популяция, то есть задаются координаты сальп случайным образом в заданном пространстве:

$$X_i = rand(0,1) \cdot (ub - lb) + lb. \quad (19)$$

$$X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}].$$

где, d – размерность задачи (количество узлов схемы).

Далее на третьем шаге для каждой сальпы вычисляется значение целевой функции, после чего сальп с наилучшим результатом назначается лидером «источника пищи» (F). На четвертом шаге обновляется позиция лидера, которая определяется по следующему выражению:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1((ub_j - lb_j) \cdot c_2 + lb_j), & \text{если } c_3 \geq 0,5, \\ F_j - c_1((ub_j - lb_j) \cdot c_2 + lb_j), & \text{если } c_3 < 0,5. \end{cases} \quad (20)$$

где, x_j^1 – координата лидера по j – му измерению;

F_j – координата источника пищи;

c_2, c_3 – случайные числа, которые колеблются в пределах от 0 до 1;

c_1 – параметр, который уменьшается с итерациями для перехода от глобального поиска к локальному:

$$c_1 = 2 \cdot e^{-\left(\frac{\Delta}{T}\right)^2}, \quad (21)$$

где, t – текущая итерация, T – максимум итераций.

Далее на пятом шаге итераций обновляется позиция последователей по формуле:

$$x_j^i = \frac{1}{2} \cdot (x_j^i + x_j^{i-1}), \quad i \geq 2. \quad (22)$$

Рассмотрим применение APC в задачах электроэнергетики, именно для оптимизации места установки компенсирующих устройств (КУ) с учётом вероятности возникновения резонанса в электрических сетях. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 3. Последовательность алгоритма, следующая:

1. Ввод параметров исследуемой сети, такие как матрицы соединений M и N в соответствии с (1) и (5), также параметры элементов исследуемой сети. Расчет установившегося режима исследуемой сети и определение уровня напряжения и потери мощности без учёта КУ.

2. Целевые функции: минимизация потерь в электрических сетях; нормализация уровня напряжения в узлах схемы, также учёт резонансных ограничений в виде штрафной функции по условию (18).

3. Генерация начального роя сальп: случайное распределение КУ по узлам.

4. Проверка на расчет потерь активной мощности ΔP ; уровень напряжений в узлах по критерию:

$$0,9 \cdot U_{\text{ном}} \leq U_i \leq 1,1 \cdot U_{\text{ном}}, \quad i - \text{номер узла}. \quad (23)$$

и возможность возникновения резонанса в соответствии с условием (18).

5. Построение АЧХ на основе предложенного метода и определение значения ПКВР для каждой гармоники порядка $6 \cdot n \pm 1$, генерируемых нелинейной нагрузкой.

6. Обновление лучшего решения (F). Выбор сальпы с минимальными потерями среди тех, у которых нет риска резонанса при невыполнении условия (18).

7. Обновление позиций, то есть корректировка положений лидера и всей цепочки сальп ($i = i + 1$).

8. Конец, выдача оптимальных координат установки КУ.

Пример расчёта на основе МРС

Рассмотрим в качестве примера южную часть ЭЭС РТ, приведённую на рисунке 1. Для обеспечения КЭЭ по уровню коэффициентов несинусоидальности по напряжениям (K_U и $K_{U(n)}$) в рассматриваемой схеме с учётом возможности возникновения резонанса используем алгоритм МРС.

Исходные данные и параметры алгоритма для расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4- Исходные данные и параметры алгоритма

Table 4 – Initial data and algorithm parameters

Размерность задачи (d)	38 узлов (поиск оптимального узла для установки КУ)
Количества сальп (N)	30
Максимальное число итерации (T)	100
Ограничение по резонансу	$K_{p(n)\text{доп}} \geq K_{p(n)}$
Целевая функция	Нормализация уровня напряжения в узлах и коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$, минимизация потерь

Результаты итерационного процесса представлены в таблице 5.

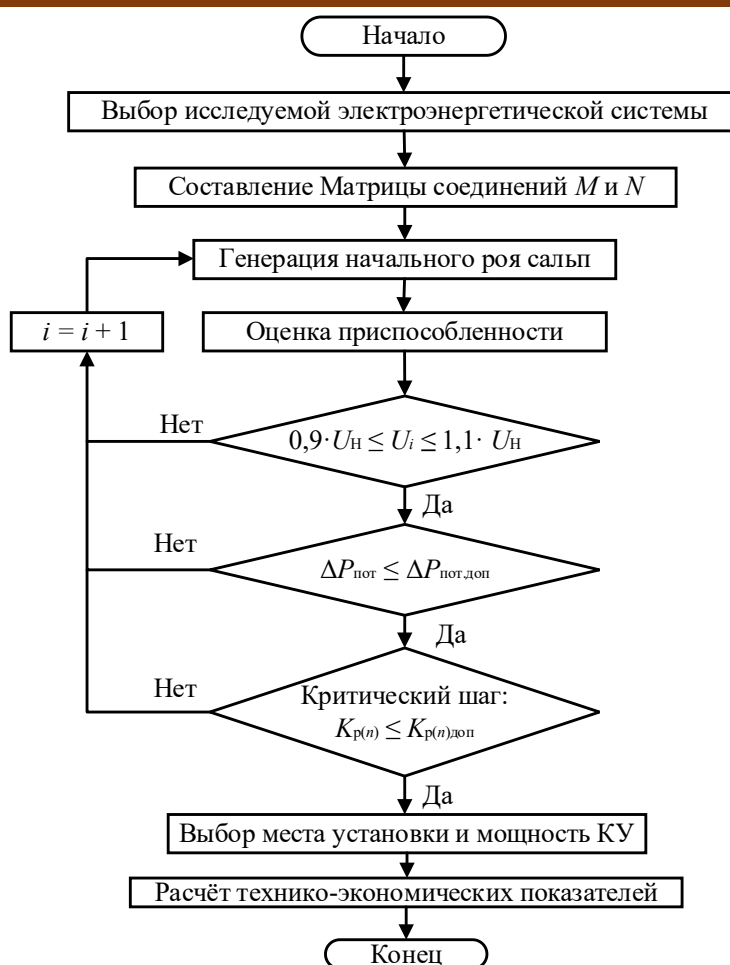


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма метода роя сальпы для выбора места установки КУ

Figure 3 – Flowchart of the salp swarm algorithm for capacitor placement

Таблица 5 – Результаты итерационного процесса алгоритма MPC

Table 5 – Iteration results of the Salp Swarm Algorithm

Итерация	Лидер роя (X^1)	Проверка по условию (18)	Результат
1	Узел 10, $Q_{КУ} = 50$ МВАр	Невыполнение условия в узле 5	Лидер перемещается к следующему положению
25	Узел 4, $Q_{КУ} = 25$ МВАр	Выполнение условия во всех узлах	Сальпы подтягиваются к узлу 4, сужая область поиска в его окрестности
100	Узел 4, $Q_{КУ} = 25$ МВАр	Выполнение условия во всех узлах	Коэффициент c_1 стремится к нулю, фиксируя положения роя в глобальном оптимуме

Результаты расчётов показывают, что на 25 итераций сальпы находят оптимальное место установки и мощность КУ, при этом все условия выполняются. Сравнение результатов расчёта в исходном состоянии и после оптимизации представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Сравнение результатов расчёта в исходном состоянии и после оптимизации

Table 6 – Comparison of calculation results in the initial state and after optimization

Параметр	Исходное состояние (без КУ)	После оптимизации MPC (с КУ)
Оптимальный узел установки	–	Узел 4
Мощность КУ ($Q_{КУ}$), МВАр	0	25
Потери мощности (ΔP), МВт	14,2	11,8
Максимальное значение $K_{p(n)}$ (узел 5)	0,88	0,76
Напряжение в критическом узле, о.е.	0,945	0,991

График изменения коэффициента K_U при оптимизационном процессе представлен на рисунке 4.

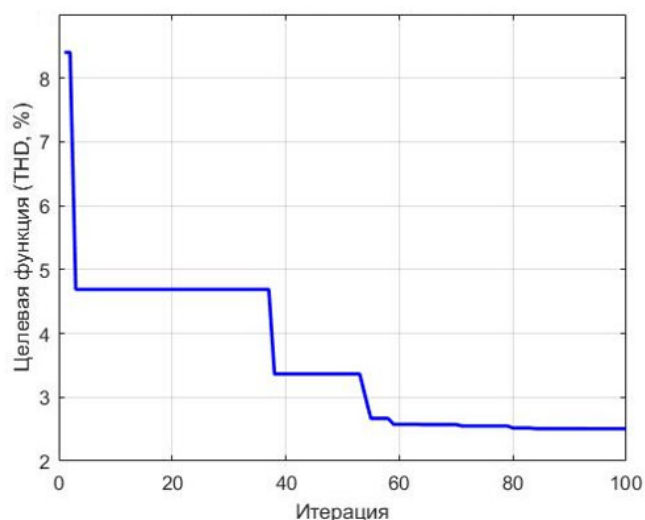


Рисунок 4 – Изменение значения коэффициента K_U при использовании MPC
Figure 4 – Variation of the K_U coefficient using the MPC

Результаты расчётов подтверждают эффективность алгоритма использования MPC для многокритериальной оптимизации размещения компенсирующих устройств с учетом рисков возникновения резонанса и дают положительный результат. По таблицам 5, 6 и графику рисунка 4 видно, что на 56 шаге итерационного процесса, все условия выполняются и алгоритм даёт желаемый результат.

Выводы

Разработана и апробирована методика многокритериальной оптимизации размещения КУ, в которой учитываются риски возникновения резонанса на частотах высших гармоник на основе АЧХ сети. Данная методика в отличие от традиционных подходов учитывает АЧХ сети и риски возникновения резонанса на частотах высших гармоник. Сравнительный анализ метаэвристических алгоритмов показал, что MPC обладает наилучшей точностью, определяет вероятности возникновения резонанса благодаря гибкой цепочечной структуре агентов и адаптивному шагу поиска, что исключает попадание системы в опасные режимы работы. Математическое моделирование режима южной части ЭЭС РТ подтвердило, что установка КУ мощностью 25 МВАр в узле 4 является оптимальным решением. Это позволило повысить напряжение в критическом узле с 94,5 до 99,1 % от номинального значения и снизить коэффициент ПКВР до безопасного уровня. Предложенный подход может быть рекомендован для использования в интеллектуальных системах управления режимами ЭЭС для обеспечения КЭЭ в условиях массового внедрения нелинейных нагрузок.

Рецензент: Киргизов А.К. – к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Rizzoni, G. Fundamentals of Electrical Engineering / G. Rizzoni. – New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. – 726 p.
2. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2013.
3. Чӯразода, Ш. Ҷ. Таҳқиқи речаи ғайрисинусоидаи дар шабакаҳои электрикӣ барои баҳодиҳии ба вучуд омадани ҳодисаи резонанс / Ш. Ҷ. Чӯразода, З. Ҳ. Ҳабибуллозода, М. К. Ҷаборов, С. Т. Исмоилов // Паёми политехникӣ. Баҳши: Таҳқиқоти муҳандисӣ. – 2025. – No. 2(70). – P. 47-58. – EDN LQLGHA.

4. Джуразода Ш.Д. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками / Ш.Д. Джуразода, З.Х. Хабибуллозода, С.А. Абдулкеримов, Х.Б. Назиров, З.С. Ганиев, М.К. Джабаров // *Электричество*. – 2026. – №6. – с. 26-31.
5. Shaheen, A. M. A Review of Meta-Heuristic Algorithms for Reactive Power Planning Problem / A. M. Shaheen, S. R. Spea, S. M. Farrag, M. A. Abido // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 215–231.
6. Meng, K. Swarm Intelligence in Power System Planning / K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Qiao // *International Journal of Clean Coal and Energy*. – 2013. – Vol. 2, No. 1. – Pp. 1–7.
7. Алехин Р.А. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками / Р.А. Алехин, Ю.П. Кубарьков, Д.В. Замаков, Д.В. Умяров // *Вестник СГТУ. Серия: Технические науки*. – 2019. – №3(63). – с. 6-19.
8. Веников В.А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учебник для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1981, 288 с.
9. Джуразода Ш.Дж. Математические задачи электроэнергетики / Ш.Дж. Джуразода, Х.Б. Назиров, З.С. Ганиев, Р.С. Ишан-Ходжаев / учебно-методическое пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. – 140 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685699 Российская Федерация. Программа для анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления: заявл. 04.09.2025; опубл. 25.09.2025 / З.Х. Хабибуллозода, С.А. Абдулкеримов, Ш.Д. Джуразода [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – EDN OTHGQR.
11. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1993. – 100 p.
12. Тульский, В.Н. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети / В.Н. Тульский, А.С. Ванин, М.А.Х. Толба // *Электричество*. – 2017. – № 6. – С. 16-23. – DOI 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23.
13. Prakash, K. Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems / K. Prakash, M. Sydulu // *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. – 2007. – Pp. 1–5.
14. Devabalaji, K. R. Optimal Location and Sizing of Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm / K. R. Devabalaji, K. Ravi, D. P. Kothari // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2015. – Vol. 71. – Pp. 383–390.
15. Elmaouhab, A. New Evolutionary Technique for Optimization of Shunt Capacitors in Distribution Networks / A. Elmaouhab, M. Boudour, R. Gueddouche // *Journal of Electrical Engineering*. – 2011. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 163–167.
16. Хабибуллозода, З.Х. Баррасии тахқиқоти ҳисоби резонанс дар шабакаҳои электрикӣ / З.Х. Хабибуллозода // *Паёми политехникӣ. Баҳши: Тахқиқоти муҳандисӣ*. – 2025. – No. 4(72). – P. 16-22. – DOI 10.65599/HYZM5412. – EDN GKBJCL.

Reference

1. Rizzoni, G. Fundamentals of Electrical Engineering / G. Rizzoni. – New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. – 726 p.
2. GOST R 32144-2013. Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Standards for the Quality of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems. – М.: Standartinform, 2013.
3. Jurazoda, Sh.J. Investigation of Non-Sinusoidal Operating Conditions in Electrical Networks for Assessing the Occurrence of Resonance Phenomena / Sh.J. Jurazoda, Z.H. Habibullozoda, M.K. Jaborov, S.T. Ismoilov // *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. – 2025. – № 2(70). – P. 47–58.
4. Dzhurazoda, Sh. D. Methodology for Predicting Resonance Phenomena in Electric Power Systems with Nonlinear Loads / Sh. D. Dzhurazoda, Z. Kh. Khabibullozoda, S. A. Abdulkarimov, H. B. Nazirov, Z. S. Ganiev, M. K. Dzhaborov // *Electricity*. – 2026. – No. 6. – Pp. 26–31.
5. Shaheen, A. M. A Review of Meta-Heuristic Algorithms for Reactive Power Planning Problem / A. M. Shaheen, S. R. Spea, S. M. Farrag, M. A. Abido // *Ain Shams Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 215–231.
6. Meng, K. Swarm Intelligence in Power System Planning / K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Qiao // *International Journal of Clean Coal and Energy*. – 2013. – Vol. 2, No. 1. – Pp. 1–7.
7. Alekhine, R. A. Methodology for Predicting Resonance Phenomena in Electric Power Systems with Nonlinear Loads / R. A. Alekhine, Yu. P. Kubarkov, D. V. Zamakov, D. V. Umyarov // *Bulletin of SSTU. Series: Technical Sciences*. – 2019. – No. 3(63). – Pp. 6–19.
8. Venikov, V. A. Electrical Systems. Mathematical Problems of Electric Power Engineering: Textbook for University Students / V. A. Venikov. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1981. – 288 p.
9. Jurazoda, Sh. D. Mathematical Problems of Electric Power Engineering / Sh. D. Jurazoda, Kh. B. Nazirov, Z. S. Ganiev, R. S. Ishan-Khodzaev. – Teaching Aid. – Vologda: Infra-Engineering, 2026. – 140 p.: ill., table.

10. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2025685699 (Russian Federation). Program for Analysis and Determination of Nodes in the Electric Power System Where Resonance Phenomena Are Possible: declared 09/04/2025; published 09.25.2025 / Z. Kh. Khabibullozoda, S. A. Abdulkarimov, Sh. D. Jurazoda [et al.]; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University ‘MPEI’”. – EDN OTHGQR.

11. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1993. – 100 p.

12. Tulsy, V. N. Optimal Placement of Capacitor Banks in a Radial Distribution Network / V. N. Tulsy, A. S. Vanin, M. A. Kh. Tolba // Electricity. – 2017. – No. 6. – Pp. 16–23. – DOI: 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23.

13. Prakash, K. Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems / K. Prakash, M. Sydulu // IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2007. – Pp. 1–5.

14. Devabalaji, K. R. Optimal Location and Sizing of Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Bacterial Foraging Optimization Algorithm / K. R. Devabalaji, K. Ravi, D. P. Kothari // Electrical Power and Energy Systems. – 2015. – Vol. 71. – Pp. 383–390.

15. Elmaouhab, A. New Evolutionary Technique for Optimization of Shunt Capacitors in Distribution Networks / A. Elmaouhab, M. Boudour, R. Gueddouche // Journal of Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 163–167.

16. Habibullozoda, Z.H. Review of Research on Resonance Analysis in Electrical Networks / Z.H. Habibullozoda // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2025. – № 4(72). – P. 16–22. – DOI: 10.65599/HYZM5412.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Ҳабибуллозода Зикрулло Ҳабибулло	Хабибуллозода Зикрулло Хабибулло	Habibullozoda Zikrullo Habibullo
Доктор PhD	Доктор PhD	Doctor PhD
ДТТ ба номи академик М.С.Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S.Osimi
E-mail: szhpei@internet.ru		
TJ	RU	EN
Љуразода Шохин Љура	Джуразода Шохин Джура	Jurazoda Shohin Jura
н.и.т., дотсенти кафедраи «Электрoэнергетика»	к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики	PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering
Донишгоҳи миллии тадқиқотии «ДЭМ», филиал дар ш. Душанбе (Ҷумҳурии Тоҷикистон)	Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в г. Душанбе (Республика Таджикистан)	National Research University «MPEI», branch in Dushanbe (Republic of Tajikistan)
E-mail: dzhuraevsh@mpei.ru		
TJ	RU	EN
Исмоилов Саидҷон Турунович	Исмоилов Саиджон Турунович	Ismoilov Saidjon Turonovich
н.и.т., дотсенти кафедраи асосҳои назарияи радио- ва электротехника	к.т.н., доцент кафедры «Теоретические основы радио- и электротехники»	Can.tech.scien., Associate Professor, Department of theoretical foundations of radio and electrical engineering
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: said.ttu@mail.ru		
TJ	RU	EN
Ҷаборов Манучеҳр Камолович	Джаборов Манучеҳр Камолович	Jaborov Manuchehr Kamolovich
унвонҷӯ	соискатель	applicant
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after Academician M.S. Osimi
E-mail: manuchehrjkm@mail.ru		