

## Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети

ТУЛЬСКИЙ В.Н., ВАНИН А.С., ТОЛБА МОХАМЕД А.

*Растущий спрос на электроэнергию ведет к увеличению потерь электроэнергии и увеличению отклонения напряжения. Потребность в эффективной электросетевой сети становится все более актуальной. Установка шунтирующих батарей конденсаторов радиальной распределительной сети всегда была важной областью исследования, в которой изучалась проблема нахождения оптимального распределения батарей конденсаторов, необходимых для улучшения уровня напряжения, уменьшения потерь электроэнергии и коррекции коэффициента мощности. В работе исследованы и представлены два этапа, позволяющие определить оптимальное распределение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети. На первом этапе определяется предварительный список узлов для установки батарей конденсаторов на основе коэффициентов чувствительности потерь. На втором этапе с помощью гибридного метода роя частиц осуществляется поиск оптимальной емкости и размещения батарей конденсаторов в выбранных узлах. Предложенный алгоритм был протестирован на тестовых схемах радиальных распределительных сетей IEEE, состоящих из 15-ти и 34-х узлов. Чтобы показать жизнеспособность предложенного подхода, полученные результаты сравнивались с другими методами. Численные результаты, полученные с помощью программного пакета MATLAB, показали возможность применения предложенного метода для нахождения оптимального решения, уменьшающего потери электроэнергии, улучшающего уровень напряжения и корректирующего коэффициент мощности.*

**Ключевые слова:** радиальная распределительная сеть, батареи конденсаторов, емкость, коэффициент чувствительности потерь, потери активной мощности

Распределительные сети являются связующим звеном между системообразующими сетями, содержащими генерацию, и конечными потребителями, поэтому для них вопросы качества электроэнергии особенно актуальны. Протекание реактивного тока в распределительной системе приводит к большим потерям электроэнергии и искажению профиля напряжения [1]. Искажение профиля напряжения является одной из наиболее важных проблем, связанных с качеством электроэнергии [2]. Исследования показывают, что почти 13% общего объема вырабатываемой энергии теряются на уровне распределения [3, 4]. Применение шунтирующих батарей конденсаторов (БСК) в распределительных сетях обеспечивает большие технические преимущества и используется для предотвращения искажений профиля напряжения и больших потерь мощности. Преимущества заключаются в снижении потерь напряжения и мощности, а также увеличении пропускной способности сети [4]. Для улучшения этих показателей важно найти оптимальное распределение батарей конденсаторов в сети, используя подходящие методы оптимизации. При некорректном выборе и размещении батарей конденсаторов достигается меньший полезный эффект и установленное оборудование эксплуатируется неэффективно.

В последнее десятилетие было разработано множество различных алгоритмов и методов оптимизации для нахождения оптимальной емкости батарей конденсаторов и мест их установки. В [5] предложена эвристическая стратегия поиска (ЭСП) для получения оптимального распределения и выбора емкости батарей конденсаторов. В [1] предложено использование «метода роя частиц» (МРЧ) совместно с коэффициентами чувствительности потерь  $K_{ч.п}$ , которые используются для уменьшения области поиска основного алгоритма. В [6] представлен генетический алгоритм с нечеткой логикой (НГА), в котором нечеткая логика была использована для поиска оптимальных мест размещения батарей конденсаторов, а генетический алгоритм — для определения их емкости. В [7] представлен новый эволюционный алгоритм (НЭА) для оптимизации мест размещения шунтирующих батарей конденсаторов в распределительной сети. В [8] представлен двухэтапный метод, в котором  $K_{ч.п}$  использован для предварительного определения узлов для установки конденсаторных батарей, а «дискретный метод роя частиц» (ДМРЧ) был использован для выбора емкости батарей конденсаторов. В [4] оптимизация выполняется на основе «метода распространения бактерий» (МРБ). Для определе-

ния критических узлов, нуждающихся в установке батарей конденсаторов, использован  $K_{ч.п}$ , а затем алгоритм «оптимизации муравьиной колонии» (ОМК) для нахождения оптимального распределения батарей конденсаторов. В [10] представлен «алгоритм опыления цветка» (АОЦ) совместно с коэффициентом потерь мощности ( $K_{п.м}$ ) для определения узлов для установки батарей конденсаторов.

В статье рассмотрено решение двух основных задач: нахождение оптимального распределения батарей конденсаторов и их емкости в радиальной распределительной сети. На первом этапе проводится анализ  $K_{ч.п}$  с помощью двух методов для определения наиболее подходящих узлов, где требуется установка батарей конденсаторов. На втором этапе применяется новый алгоритм для определения емкости батарей конденсаторов и их размещения в узлах — гибридный МРЧ (ГМРЧ).

**Постановка задачи.** Оптимальное размещение батарей конденсаторов в распределительной сети улучшает уровень напряжения и снижает потери активной мощности.

С экономической точки зрения установка компенсирующих устройств позволяет получить выгоду от снижения потерь активной мощности, но требует затрат на приобретение, монтаж и эксплуатацию. Целью установки компенсирующих устройств является минимизация суммарных расходов на эксплуатацию распределительной сети.

Математически эту задачу можно описать как минимизацию целевой функции затрат на компенсацию потерь мощности и стоимость установки батарей конденсаторов (\$/год), определяемую по формуле

$$F = K_{п} \Delta P + \left[ \sum_{i=1}^J (K_{Cj} Q_{Cj}) \right], \quad (1)$$

где  $\Delta P$  — полные потери активной мощности в сети;  $J$  — число узлов, в которых устанавливаются БСК;  $K_{п}$  — эквивалентная годовая стоимость 1 кВт потерь, \$/кВт;  $K_{Cj}$  — эквивалентная годовая стоимость установки 1 квар батарей конденсаторов емкостью  $Q_{Cj}$ , расположенных на  $j$ -й подстанции.

Доступные значения емкости батарей конденсаторов  $Q_{Cj}$  и соответствующие им эквивалентные годовые стоимости  $K_{Cj}$  приведены в [7, 8].

На оптимизационный расчет накладываются следующие ограничения.

1. Напряжение на шинах распределительной сети должно находиться в допустимых пределах:

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (2)$$

где  $n$  — число узлов нагрузки.

2. Наибольшая емкость используемой батареи конденсатора ограничена максимальной реактивной мощностью нагрузки  $Q_C$ :

$$Q_C \leq \sum Q_{н}. \quad (3)$$

3. Полная мощность  $S$ , передаваемая по линиям распределительной сети, должна быть меньше предельных значений:

$$S_{л(i)} \leq S_{\text{доп.л}i}, \quad (4)$$

где  $i=1,2,\dots,N$  ( $N$  — число линий электропередачи).

**Анализ коэффициента чувствительности.** Конденсаторные батареи следует располагать в узлах с наименьшим напряжением ( $U_i < U_{\min}$ ) — так называемых «слабых узлах» [10, 11]. Предварительно узлы, в которых следует установить батареи конденсаторов, выбираются с учетом  $K_{ч.п}$  и уровня напряжения. Это позволяет уменьшить область исследования при выполнении оптимизации предложенным алгоритмом.

Потери активной мощности в распределительной линии между узлами  $i-j$  (рис. 1) выражаются как

$$\Delta P_{л} = I_{ij}^2 R_{ij} = \frac{(P_j^2 + Q_j^2) R_{ij}}{U_j^2}, \quad (5)$$

где  $P_j$  и  $Q_j$  — активная и реактивная мощность, передаваемая по линии.

$K_{ч.п}$  представляет собой отношение изменения потерь в линии к изменению компенсации реактивной мощности в конце линии и определяется по формуле

$$K_{ч.п(i)} = \frac{dP_{лиj}}{dQ_j} = \frac{2Q_j R_{ij}}{U_j^2}. \quad (6)$$

Коэффициент чувствительности напряжения  $K_{ч.н}$  получают из отношения значения основного напряжения в узлах  $U_i$  к минимальному пределу напряжения (0,95 отн. ед.):

$$K_{ч.н(i)} = |U_i| / 0,95. \quad (7)$$

В статье рассмотрены два варианта предварительного выбора узлов на основе  $K_{ч.п}$  и  $K_{ч.н}$ . В первом варианте установка батарей конденсаторов осуществляется в узлах с заниженным уровнем напряжения. Для этого выбираются узлы с низкими значениями  $K_{ч.н}$  ( $K_{ч.н} < 1,01$ ). Во втором варианте

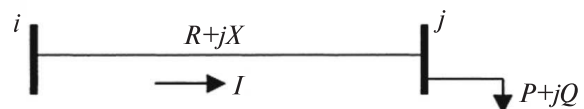


Рис. 1. Распределительная линия между шинами  $i$  и  $j$

приоритетным является снижение потерь активной мощности, при этом установка конденсаторных батарей не должна приводить к недопустимому повышению напряжения. Для этого отбираются узлы, в которых  $K_{ч.н} < 1,05$ . Из этих узлов выбираются те, в которых максимальное значение  $K_{ч.п}$ .

Выбранные узлы-претенденты вводятся в качестве переменных в алгоритм оптимизации.

#### Гибридный оптимизационный метод роя частиц.

**Метод роя частиц.** Этот метод является одним из эволюционных алгоритмов, который впервые был предложен в 1995 г. [13, 15]. Идея оптимизации основана на обобщении результатов наблюдения за стайными животными. В МРЧ популяции особей эволюционируют посредством сотрудничества и конкуренции между собой. Каждая особь, именуемая частицей популяции, является потенциальным решением задачи. Каждому положению в пространстве решений соответствуют определенные значения целевой функции. Каждая частица стремится занять наилучшую позицию, изменяя направление и скорость движения в пространстве решений [1, 8].

Скорость частицы представляется вектором:

$$v_i^t = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,N_p}]^t,$$

где  $i=1,2,\dots,N_p$  — число частиц в популяции;  $t$  — номер итерации.

Каждая частица в МРЧ запоминает свои координаты в  $n$ -мерном пространстве решений, при которых было получено наилучшее решение ( $p_{н.л}$ )\*. Из наилучших индивидуальных решений выбирается общее наилучшее решение ( $g_{н.л}$ ).

Основная идея МРЧ заключается в придании частицам на каждой итерации ускорений, направленных в сторону индивидуальных и общего наилучших решений.

Оптимизационная задача при этом может быть описана как минимизация целевой функции. На каждой итерации выполняется изменение скоростей и координат частиц согласно уравнениям:

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1 r_1 [p_{н.л.и}^t - x_i^t] + c_2 r_2 [g_{н.л.и}^t - x_i^t]; \quad (8)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \Delta t v_i^{t+1}. \quad (9)$$

Положительные константы  $c_1$  и  $c_2$  определяют степень влияния положения локального и глобального наилучших решений на направление движения частицы. Инерция частицы  $w$  — это коэффициент, который определяет влияние скорости из предыдущей итерации на текущую скорость. Переменные  $r_1$  и  $r_2$  — два случайных числа в диапазоне

\* Где  $n$  — число переменных.

[0, 1]. Уравнение (9) показывает изменение позиции согласно с предыдущей скоростью и расположением, где  $\Delta t=1$ .

**Гибридный метод роя частиц.** Предлагаемый альтернативный гибридный метод сочетает в себе метод роя частиц в фазе эволюции и метод Ньютона на стадии изучения (после достижения критерия остановки МРЧ). Гибридный метод оптимизации, принятый в статье, также представлен в литературе как алгоритм с локальным поиском или оптимизация, основанная на эволюции Ламарка [15]. Сам по себе метод Ньютона обладает рядом недостатков и не может быть использован для поиска оптимального значения самостоятельно из-за вероятности получения локального решения и высокой трудоемкости расчета матрицы Гессе. Предложенный гибридный метод оптимизации был реализован в программной среде Matlab [15].

**Описание алгоритма.** Предложенный метод оптимальной расстановки компенсирующих устройств в радиальной распределительной сети включает в себя следующие шаги.

1. Задание исходных данных:

список узлов сети;

активная (кВ) и реактивная (квар) мощность нагрузки для каждого узла;

сопротивления ветвей схемы замещения ( $Z=R+jX$ ), а также узлы начала и конца каждой линии;

ограничения, заданные уравнениями (2)—(5);

параметры алгоритма HPSO.

2. Расчет исходного установившегося режима без компенсации реактивной мощности и определение:

напряжения в каждом узле сети  $U_i$ ;

потерь активной мощности  $\Delta P$ ;

полного потока мощности через каждую линию  $S_{ли}$ ;

$K_{ч.п}$  для всех узлов.

3. Создание начальных состояний для оптимизационного расчета. Число состояний  $N_p$  и их начальные позиции выбираются случайным образом из заданного диапазона значений  $[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN_p}] = [Q_{C1}, Q_{C2}, \dots, Q_{Cj}]$ .

4. Генерация скоростей частиц  $v_i^t$ .

5. Расчет установившегося режима для каждой частицы и получение следующих результатов:

напряжение в каждом узле сети  $U_i$ ;

потери активной мощности  $\Delta P$ ;

поток полной мощности через каждую ветвь  $S_{ли}$ .

6. Расчет целевой функции по формуле (1) и проверка выполнения ограничений для каждой частицы.

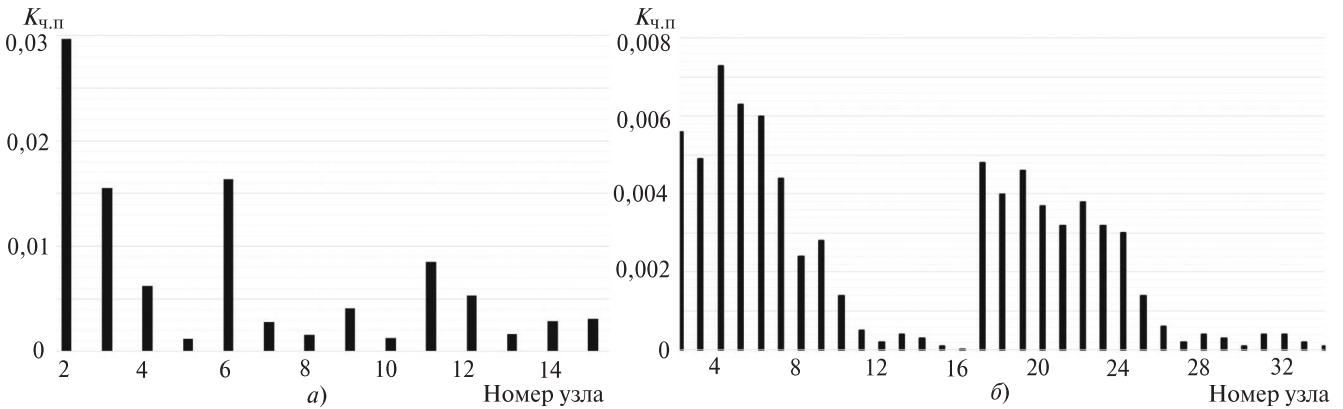


Рис. 2. Значения  $K_{ч.п}$  для тестовой сети IEEE: а — 15 узлов; б — 34 узла

7. Оценка полученных значений целевой функции; переопределение локальных  $p_{н.л}$  и глобального  $g_{н.л}$  наилучших решений.

8. Вычисление скорости и местоположения частицы согласно уравнениям (8) и (9) с учетом ограничений (2)—(4).

9. Повторение шагов пп. 4—7 до тех пор, пока критерий завершения алгоритма роя частиц не будет завершён.

10. Запуск квазиньютоновского алгоритма оптимизации, где в качестве исходного приближения задается решение, полученное на 9-м шаге.

11. Запись результатов оптимизации и параметров установившегося режима для итогового состояния.

**Результаты тестового расчета.** Предложенный метод, использующий гибридный алгоритм, был реализован в программном пакете MATLAB и протестирован на двух стандартных тестовых схемах IEEE для радиальных распределительных сетей, состоящих из 15 узлов [16] и 34 узлов [5]. Допустимый диапазон изменения напряжения был выбран 0,95—1,05 отн. ед., годовая стоимость потерь мощности  $K_{п} = 168$  \$/кВт. Предварительный выбор узлов проводится двумя способами. В первом случае выбираются узлы с  $K_{ч.п}$  ниже 1,01 отн.ед., во втором случае — с  $K_{ч.п}$  ниже 1,05 отн.ед. и высоким значением  $K_{ч.п}$ . Затем с помощью алгоритма ГМРЧ обеспечивается оптимальный выбор емкостей и размещение батарей конденсаторов.

**Результаты для системы из 15-ти узлов.** Номинальное напряжение этой тестовой модели равно 11 кВ, как в [16]. Значения  $K_{ч.п}$  показаны на рис. 2,а, где предварительный выбор узлов осуществлен первым способом — {6, 3, 11, 4, 12, 15, 14, 7 и 13} с полной компенсацией реактивной мощности 1200 кВАр, и вторым способом — {2, 6, 3, 11, 4, 12, 9 и 15} с такой же компенсацией реактивной мощности. Из результатов, представленных в табл. 1, очевидно, что второй способ имеет лучшие

показатели относительно первого способа и других методов оптимизации. Полные потери мощности уменьшены с 61,8 до 30,1 кВт, минимальное значение

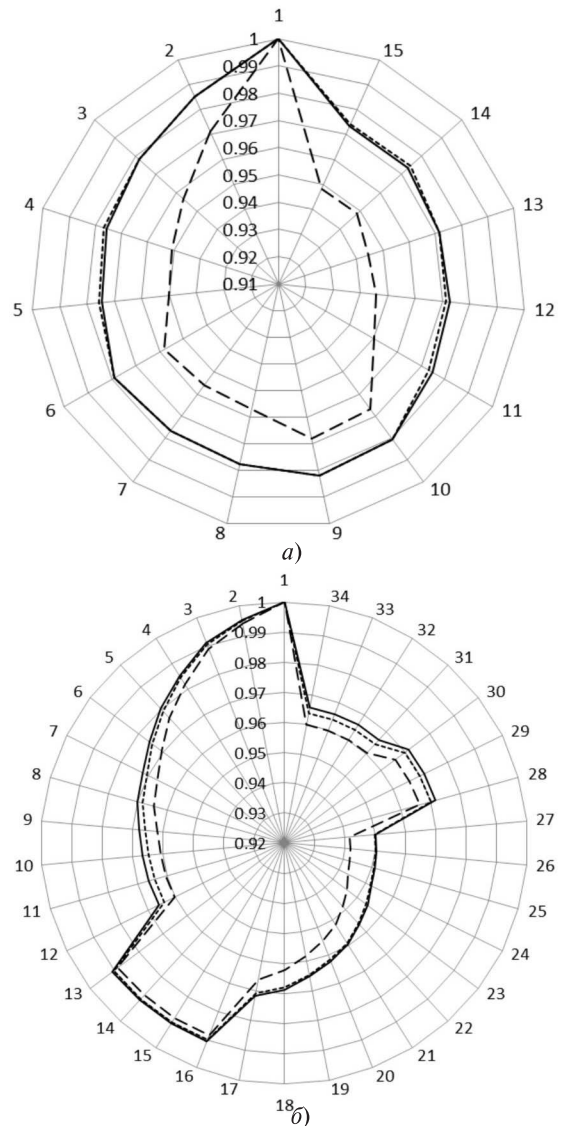


Рис. 3. Влияние компенсирующих устройств на уровень напряжения по двум методам для системы IEEE: а — 15 узлов; б — 34 узла: ---- до компенсации; -.-.- метод 1; — метод 2

Таблица 1

Параметр	Значение параметра							
	Без компенсации	С компенсацией по разным методам						
		НГА 2007[6]	МРЧ 2007[1]	ДМРЧ 2014[8]	АОМК 2015[9]	АОЦ 2015[10]	Метод-1 2017	Метод-2 2017
Полные потери, кВт	61,794	30,441	32,7	30,446	36,81	30,7112	30,7348	30,1164
Снижение потерь, %	—	50,738	47,082	50,729	40,43	50,3	50,262	51,2632
Напряжение, отн.ед. минимальное (узел 10)	0,9445	0,9677	0,9673	0,9712	0,9631	0,9676	0,9714	0,9715
максимальное отн. ед. (узел 2)	0,9713	—	—	—	0,9834	—	0,9852	0,9853
Общий коэффициент мощности	0,7016	—	—	—	—	—	0,9980	0,9991
Емкость конденсатора*, кВАр	—	200 (4) 100 (6) 300 (7) 300 (11) 200 (15)	871 (3) 321 (6)	450(4) 450(6) 150 (13) 150 (15)	630 (4) 410 (6)	350 (6) 350(11) 300 (15)	600 (4) 450 (6) 150 (13)	450 (4) 450 (6) 150 (11) 150 (12)
$\sum Q_C$ , квар	—	1100	1192	1200	1040	1000	1200	1200
Полная стоимость, \$/год $P_{пот}$	10381,0	5114,1	5493,6	5115,0	6167,3	5159,48	5163,4	5059,6
$Q_C$	—	390,0	269,7	378,0	245,85	330,0	320,85	377,7
годовая	10381,0	5504,1	5763,3	5493,0	6413,2	5489,48	5484,3	5437,25
Экономия (\$/год)	—	4877	4617,7	4888,1	3967,9	4891,52	4896,7	4943,75
%	—	46,979	44,482	47,086	38,222	47,12	47,17	47,623

\* В скобках — расположение батареи конденсаторов (номер узла).

Таблица 2

Параметр	Значение параметра								
	Без компенсации	С компенсацией по разным методам							
		ЭСП 1997[5]	МРЧ 2007[1]	НИТ 2011 [7]	ДМРЧ 2014 [8]	ОБП 2015[4]	ОМК 2015[9]	Метод-1 2017	Метод-2 2017
Полные потери, кВт	221,72	167,0	168,8	161,33	163,3	160,6	162,68	166,9983	159,2765
Снижение потерь, %	—	24,68	23,87	27,232	60,3	27,566	26,628	24,68	28,163
Напряжение, отн.ед. минимальное (узел 10)	0,9417	0,9515	0,9496	0,9506	0,9501	0,9505	0,9501	0,9500	0,9503
максимальное отн. ед. (узел 2)	0,9941	—	—	0,9952	—	—	0,9950	0,9950	0,9953
Общий коэффициент мощности	0,8556	—	—	—	—	—	—	0,9801	0,9989
Емкость конденсатора*, кВАр	—	-(26) 1400 750(11) 300(17) 250(4)	781(19) 803(22) 479(20)	-(8) 1050 75(18) 750(25)	-(19) 1050 300(22) 600(26)	625(10) 940(20) 610(25)	645(9) 719(22) 665(25)	900(19) 450(21) 600(26)	600(5) 600(9) 450(18) 450(21) 600(24)
$\sum Q_C$ , квар	—	2700	2063	2550	1950	2150	2029	1950	2700
Полная стоимость, \$/год $P_{пот}$	37248,76	28056,0	28358,0	27104,0	27440,0	26981,0	27330,24	28056,0	26758,0
$Q_C$	—	680,9	527	653,4	483	428,7	471	410,55	623,7
годовая	37248,76	28737,0	28885,0	27757,0	27923,0	27410,0	27801,24	28466,0	27382,0
Экономия (\$/год)	—	8511,8	8363,4	9491,9	9325,8	9839,3	9447,52	8782,76	9866,76
%	—	22,851	22,453	25,483	25,036	26,415	25,36	23,578	26,5

\* В скобках — расположение батареи конденсаторов (номер узла).

ние напряжения улучшено с 0,94 до 0,97 отн. ед., полная годовая стоимость снижена с 10381 до 5437,25 \$/год, коэффициент мощности улучшен с 0,7016 до 0,9991. На рис. 3,а показан эффект воздействия устройств компенсации на профиль напряжения двумя методами для системы, состоящей из 15 узлов.

*Результаты для системы, состоящей из 34 узлов.*

В этой тестовой модели номинальное напряжение равно 11 кВ, как в [5]. Результаты  $K_{ч.п}$  изображены на рис. 2,б. Первым способом выбраны следующие узлы для установки батарей конденсаторов — {19, 22, 20, 21, 23, 24, 25, 26 и 27} с полной компенсацией реактивной мощности 1950 кВАр, и вторым способом — {4, 5, 6, 2, 3, 17, 19, 7, 18, 22, 20, 21, 23, 24 и 9} с полной компенсацией реактивной мощности 2700 кВАр. Из результатов, приведенных в табл. 2, видно, что второй метод дает лучшие результаты, чем первый способ и другие методы оптимизации. Полные потери мощности уменьшены с 221,72 до 159,27 кВт, минимальное напряжение улучшено с 0,94 до 0,95 отн. ед., полная годовая стоимость снижена с 37248,76 до 27382 \$/год, коэффициент мощности улучшен с 0,8556 до 0,9989. На рис. 3,б показано влияние устройств компенсации на профиль напряжения двумя методами для сети, состоящей из 34 узлов.

**Заключение.** Гибридный метод оптимизации, основанный на «методе роя частиц» и методе Ньютона, показал лучшие по сравнению с другими методами результаты при решении задачи выбора и расстановки батарей конденсаторов в радиальных распределительных сетях. Предварительный выбор узлов для расстановки батарей конденсаторов позволяет повысить эффективность работы оптимизационного алгоритма. Сравнились два способа предварительного отбора узлов. В первом случае в качестве претендентов выбирались узлы с минимальным уровнем напряжения, во втором — узлы с наибольшими значениями коэффициентов чувствительности потерь. Сравнение результатов показало целесообразность применения второго способа для предварительного выбора мест расстановки компенсирующих устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prakash K., Sydulu M. Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. — IEEE power engineering society general meeting, 2007, pp. 1–5.
2. Tulsy V.N., Vanin A.S., Tolba M.A., Diab A.A. Measurement and analysis of Radial Distribution System with Reactive Power Compensation—Case Study: Moscow Region. — IEEE NW, Russia Young Researcher in Electrical and Electronic Engineering Conference (EICovRusNW), 2016, pp. 710 – 716.
3. Song Y.H., Wang G.S., Johns A.T., Wang P.Y. Distribution Network Reconfiguration for loss Reduction Using Fuzzy controlled evolutionary programming. — IEEE Trans. Gener., trans., Distri., July 1997, vol. 144, No. 4.
4. Devabalaji K.R., Ravi K., Kothari D.P. Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm. — Electrical Power and Energy Systems 71, 2015, pp. 383–390.
5. Chis M., M.M. Salama A., Jayaram S. Capacitor placement in distribution systems using heuristic strategies. — IEEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution, 1997, vol. 144, iss. 3.
6. Prasad P.V., Sivanagaraju S., Sreenivasulu N. A fuzzy genetic algorithm for optimal capacitor placement in radial distribution systems. — ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007, vol. 2, No. 3.
7. Elmaouhab A., Boudour M., Gueddouche R. New Evolutionary Technique for Optimization Shunt Capacitors in Distribution Networks. — Journal of Electrical Engineering, 2011, vol. 26, No. 3, pp. 163–167.
8. Elsheikh A., Helmy Y., Abouelseoud Y., Elsherif A. Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems: (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).
9. Abou El-Ela A.A., Kinawy A.M., Mouwafi M.T., Elshehiemy R.A. Optimal Sizing and Sizing of Capacitors for Voltage Enhancement of Distribution Systems. — IEEE Power Engineering Conference (UPEC), 2015 50th International Universities, 2015.
10. Abdelaziz A.Y., Ali E.S., Abd Elazim S.M. Optimal Sizing and Locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index. — Engineering Science and Technology, an International Journal, 2015.
11. Shirmohammadi D., Hong H.W., Semlyen A., Lou G.X. A compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. — IEEE Transaction on Power Systems, May, 1988, vol. 3, No. 2.
12. Injeti S.K., Thunuguntla V.K., Shareef M. Optimal allocation of capacitor banks in radial distribution systems for minimization of real power loss and maximization of network savings using bio-inspired optimization algorithms. — Electrical Power and Energy Systems 69, 2015, pp. 441–455.
13. Eberhart R.C., Kennedy J. A new optimizer using particles swarm theory. — Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, 4–6 October 1995, pp. 39–43.
14. Kennedy J., Eberhart R.C. Particle swarm optimization, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995, pp. 1942–1948.
15. Santos Coelho L.D., Mariani V.C. Particle Swarm Optimization with Quasi-Newton Local Search for Solving Economic Dispatch Problem. — IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei (Taiwan). October 8–11, 2006.
16. Das D., Kothari P., Kalam A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. — International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1995, vol. 17, iss. 5, pp. 335–346.

[20.03.2017]

*Авторы: Тульский Владимир Николаевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ — ныне «Национальный исследовательский университет «МЭИ» — «НИУ «МЭИ») в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методики определения физического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения». Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».*

**Ванин Артем Сергеевич** окончил «НИУ «МЭИ» в 2011 г. В 2014 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка методики расчета надежности систем электроснабжения относительно узлов нагрузки с учетом провалов напряжения». Научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические системы» НИУ «МЭИ».

**Толба Мохамед Али Хассан** в 2013 г. получил степень магистра в университете Минья (Эль-Минья, Египет). Ассистент кафедры в Центре ядерных исследований Египетского управления атомной энергетики, Каир (Египет). Аспирант кафедры «Электроэнергетические системы» «НИУ «МЭИ».

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2017, No. 6, pp. 16–23

DOI:10.24160/0013-5380-2017-6-16-23

## Optimal Capacitor Allocations and Sizing in Radial Distribution Networks Using a Novel Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm

**TUL'SKY Vladimir N.** («National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — «NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**VANIN Artem S.** («NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

**TOLBA Mohamed A.** («NRU «MPEI», Moscow, Russia) — PhD student

*The increasing greatly demand leads to increase in system power losses and voltage profile disturbances. The need for more effective power distribution system has become more urgent. In this regards, shunt capacitors installation on radial distribution has always been an important research area to get the optimal allocations required for voltage profile improvement, system losses reduction and power factor correction. The developed study provides two-stages to evaluate the optimal allocation of capacitors in radial distribution system. In this paper, two stages are introduced. In the first stage, the loss sensitivity analysis with two methods is employed to select the most appropriate candidate capacitor placement. In the second stage, a novel hybrid particle swarm optimization (HPSO) algorithm is implemented to find optimal sizing and allocations of capacitors and their settings from the selected buses. The proposed algorithm has been tested on different test systems as 15-bus, and 34-bus IEEE standard radial distribution systems. Moreover, the proposed algorithm has been tested on different sizes of other radial distribution systems. In order to validate the proposed approach, the obtained results have been compared with other methods. The numerical results have been proved the capability of the proposed approach to find the optimal solutions with system losses reduction, voltage profile improvement and power factor correction. Numerical results have been evaluated by MATLAB package.*

**Key words:** radial distribution system, capacitor allocation, loss sensitivity factor (LSF), hybrid particle swarm optimization (HPSO), voltage profile, active power losses

### REFERENCES

1. **Prakash K., Sydulu M.** Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems. — IEEE power engineering society general meeting, 2007, pp. 1–5.
2. **Tulsky V.N., Vanin A.S., Tolba M.A., Diab A.A.** Measurement and analysis of Radial Distribution System with Reactive Power Compensation—Case Study: Moscow Region. — IEEE NW, Russia Young Researcher in Electrical and Electronic Engineering Conferebce (EICovRusNW), 2016, pp. 710 – 716,
3. **Song Y.H., Wang G.S., Johns A.T., Wang P.Y.** Distribution Network Reconfiguration for loss Reduction Using Fuzzy controlled evolutionary programming. — IEEE Trans. Gener., trans., Distri., July 1997, vol. 144, No. 4.
4. **Devabalaji K.R., Ravi K., Kothari D.P.** Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm. — Electrical Power and Energy Systems 71, 2015, pp. 383–390,
5. **Chis M., M.M. Salama A., Jayaram S.** Capacitor placement in distribution systems using heuristic strategies. — IEEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution, 1997, vol. 144, iss. 3.
6. **Prasad P.V., Sivanagaraju S., Sreenivasulu N.** A fuzzy genetic algorithm for optimal capacitor placement in radial distribution systems. — ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007, vol. 2, No. 3.
7. **Elmaouhab A., Boudour M., Gueddouche R.** New Evolutionary Technique for Optimization Shunt Capacitors in Distribution Networks. — Journal of Electrical Engineering, 2011, vol. 26, No. 3, pp. 163–167.
8. **Elsheikh A., Helmy Y., Abouelseoud Y., Elsherif A.** Optimal capacitor placement and sizing in radial electric power systems: (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).
9. **Abou El-Ela A.A., Kinawy A.M., Mouwafi M.T., Elshehiemy R.A.** Optimal Sizing and Sizing of Capacitors for Voltage Enhancement of Distribution Systems. — IEEE Power Engineering Conference (UPEC), 2015 50th International Universities, 2015.
10. **Abdelaziz A.Y., Ali E.S., Abd Elazim S.M.** Optimal Sizing and Locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index. — Engineering Science and Technology, an International Journal, 2015.
11. **Shirmohammadi D., Hong H.W., Semlyen A., Lou G.X.** A compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. — IEEE Transaction on Power Systems, May, 1988, vol. 3, No. 2.
12. **Injeti S.K., Thunuguntla V.K., Shareef M.** Optimal allocation of capacitor banks in radial distribution systems for minimization of

real power loss and maximization of network savings using bio-inspired optimization algorithms. — *Electrical Power and Energy Systems* 69, 2015, pp. 441–455.

13. **Eberhart R.C., Kennedy J.** A new optimizer using particles swarm theory. — *Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 4–6 October 1995, pp. 39–43.

14. **Kennedy J., Eberhart R.C.** Particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995, pp. 1942–1948.

15. **Santos Coelho L.D., Mariani V.C.** Particle Swarm Optimization with Quasi-Newton Local Search for Solving Economic Dispatch Problem. — *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei (Taiwan)*. October 8–11, 2006.

16. **Das D., Kothari P., Kalam A.** Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. — *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 1995, vol. 17, iss. 5, pp. 335–346.

[20.03.2017]