

Optimization of Transformation Coefficients Using Direct Search and Swarm Intelligence

Manusov V.Z., Matrenin P.V., Orlov D.V.

Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

Abstract. This research considers optimization of tap position of transformers in power systems to reduce power losses. Now, methods based on heuristic rules and fuzzy logic, or methods that optimize parts of the whole system separately, are applied to this problem. The first approach requires expert knowledge about processes in the network. The second methods are not able to consider all the interrelations of system's parts, while changes in segment affect the entire system. Both approaches are tough to implement and require adjustment to the tasks solved. It needs to implement algorithms that can take into account complex interrelations of optimized variables and self-adapt to optimization task. It is advisable to use algorithms given complex interrelations of optimized variables and independently adapting from optimization tasks. Such algorithms include Swarm Intelligence algorithms. Their main features are self-organization, which allows them to automatically adapt to conditions of tasks, and the ability to efficiently exit from local extremes. Thus, they do not require specialized knowledge of the system, in contrast to fuzzy logic. In addition, they can efficiently find quasi-optimal solutions converging to the global optimum. This research applies Particle Swarm Optimization algorithm (PSO). The model of Tajik power system used in experiments. It was found out that PSO is much more efficient than greedy heuristics and more flexible and easier to use than fuzzy logic. PSO allows reducing active power losses from 48.01 to 45.83 MW (4.5%). With all, the effect of using greedy heuristics or fuzzy logic is two times smaller (2.3%).

Keywords: optimization, smart grid, transformer, active power loss, directed search, swarm intelligence.

Optimizarea coeficienților de transformare cu utilizarea algoritmilor de enumerare direcționată și inteligență roi

Manusov V.Z., Matrenin V.Z., Orlov D.V.

Universitatea Națională Tehnică de Stat din Novosibirsk
Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. În lucrare se examinează problema optimizării coeficienților de transformare în rețelele cu tensiunea 110-220 kV cu scopul diminuării pierderilor de putere activă. Această problemă se referă la clasa NP-completă din domeniul combinatoric. În calitate de obiect al investigației s-a selectat un fragment al sistemului electroenergetic din Tadjikistan. S-a realizat compararea algoritmilor bazați pe conceptul de căutare direcționată și în baza principiului de inteligență roi. S-a constatat, că schimbările doar în cadrul unui segment al rețelei prin modificarea poziționării contactelor mobile ale unui singur transformator nu este eficientă. Rezultate mai performante se obțin în baza algoritmilor, care iau în considerare caracterul complex al influenței mutuale ale variabilelor optimizate. Pentru soluționarea problemei s-a selectat algoritmul de tip roi pentru compartimentul dat al rețelei. S-a studiat influența impactului limitării vitezei particulelor de roi asupra calității soluției obținute a problemei. Limitarea prea mare a vitezei particulelor de roi poate avea consecințe negative. Testele au confirmat, că utilizarea algoritmului particulelor de roi se poziționează ca mult mai eficientă în comparație cu metoda de căutare direcționată și metoda bazată pe reguli euristice la folosirea logicii fuzzy. Algoritmul particulelor de roi are o performanță suficientă pentru utilizare în sistemele automatizate de management a rețelei electrice inteligente. Utilizarea algoritmului inteligenței de roi permite diminuarea pierderilor de putere în rețeaua analizată de la 48.01 MW până la 45.83 MW, ce constituie 4.5%. Diminuarea pierderii de putere activă este echivalentă cu economisirea a circa 19 milioane de ruble. Eficiența estimată ca urmare a utilizării algoritmilor euristici este cam de 2 ori mai redusă în comparație cu algoritmi de inteligență roi, care pentru porțiunea analizată conduc la diminuarea pierderilor de putere activă doar la nivel de 2.3%. De asemenea s-a constatat, că selectarea corectă a valorii parametrului, care limitează viteza particulelor de roi poate asigura o sporire suplimentară a calității soluției căutate.

Cuvinte-cheie: optimizare combinatorică, sistem inteligent de alimentare cu energie, transformator, pierderi de putere activă, căutarea direcționată, inteligență de roi.

**Оптимизация коэффициентов трансформации с применением алгоритмов направленного перебора и роевого интеллекта
Манусов В.З., Матренин П.В., Орлов Д.В.**

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрена задача оптимизации положений анцапф трансформаторов системы электроснабжения для снижения потерь мощности. В настоящее время применяются методы, основанные на эвристических правилах и нечеткой логике или методы, оптимизирующие части системы по-отдельности. Первый подход требует специальных экспертных знаний о процессах в сети. Вторая группа методов не способна полностью учесть взаимосвязи всех частей электросети, при том что изменения одного сегмента влияют на всю систему. Оба подхода сложны в применении и требуют подстройки под решаемую задачу. Целесообразно использовать алгоритм, который способен учитывать сложные взаимосвязи оптимизируемых переменных и самостоятельно адаптироваться под решаемые задачи. К таким алгоритмам относятся стохастические алгоритмы роевого интеллекта. Их главными особенностями являются самоорганизация, позволяющая им автоматически адаптироваться под условия решаемых задач, и возможность эффективно выходить из локальных экстремумов. Таким образом, они не требуют специальных знаний о системе, в отличие от методов нечеткой логики. При этом способны эффективно находить близкие к оптимальным решения, а их сходимость к глобальному оптимуму задачи математически обоснована, в отличие от жадных эвристик. В данном исследовании применен алгоритм роя частиц. Эксперименты проводились на модели системы электроснабжения Таджикистана. Было показано, что алгоритм роя частиц значительно эффективнее жадных эвристических алгоритмов, более гибкий и простой в применении, чем правила, основанные на нечеткой логике. Алгоритм роя частиц позволил снизить потери с 48.01 МВт до 45.83 МВт (4.5%) для рассматриваемой системы. При этом эффект от применения жадных эвристик или нечеткой логики почти в 2 раза меньше (2.3%). Кроме того, эксперименты показали, что правильный выбор ограничения скорости частиц позволяет добиться дополнительного повышения качества решений.

Ключевые слова: комбинаторная оптимизация, интеллектуальные системы электроснабжения, трансформатор, потери активной мощности, направленный перебор, роевой интеллект.

Введение

Потери мощности в электрических сетях представляют собой один из важных показателей экономичности и эффективности их работы. Потерями в электросетях называют разницу между переданной производителем электроэнергии и учтенной электроэнергией потребителя. Потери возникают в силовых трансформаторах, в линиях электропередачи, особенно при передаче энергии на большие расстояния.

Регулирование напряжения в узлах электроэнергетической системы позволяет решать следующие основные задачи:

- обеспечение баланса выработки и потребления электрической энергии;
- обеспечение требуемого уровня напряжения на выводах потребителей электрической энергии.

Существует регулирование напряжения по продольной и поперечной осям. Предпочтительнее решать задачу обеспечения баланса выработки и потребления электрической энергии с помощью поперечного регулирования, при котором изменяются перетоки активных мощностей. Обеспечение требуемого уровня

напряжения на выводах потребителей электрической энергии решается, в основном, с помощью продольного регулирования. Одним из способов продольного регулирования является использование трансформаторов с регулированием под нагрузкой (РПН) [1, 2, 3].

Существующая централизованная система управления препятствует появлению в сети множества активных объектов. Основой в централизованной системе является центр управления, где определяются режимы работы всех объектов управления [2, 4]. При появлении нового объекта или изменении желания субъектов, необходимо перенастраивать систему, что является очень трудоемким процессом.

Появление в сети распределенных средств регулирования режима напряжения, принадлежащих разным субъектам, имеющих собственные цели регулирования, определяет необходимость качественно нового решения задачи регулирования напряжения в электрических сетях. Требуется разработка новых методов для управления режимов работы систем электроснабжения, включающих распределенную генерацию. В

настоящее время во всем мире обратили внимание на создание интеллектуальных сетей электроснабжения (Smart Grid).

В сетях высокого и среднего напряжений протекают большие мощности, сопровождаемые большими потерями. Задача снижения потерь электроэнергии при передаче может решаться с помощью поперечного регулирования напряжения.

Задача регулирования напряжения может быть решена путем настройки коэффициентов трансформаторов в сети. В настоящее время задача выбора положения анцапф трансформаторов, как правило, решается с помощью разбиения задачи на отдельные части с оптимизацией каждой из них [2, 3, 5], либо с использованием эвристических правил, часто основанных на нечеткой логике [6, 7]. При этом для оптимизации систем электроснабжения целесообразно применять стохастические популяционные алгоритмы, которые способны находить квазиоптимальные решения за приемлемое время и, главное, самостоятельно адаптироваться под условия решаемых задач и топологии оптимизируемых систем [8, 9].

В данной работе проводится сравнение детерминированных методов, таких как направленный перебор и использование списка нечетких правил со стохастическим алгоритмом роя частиц.

I. ОПИСАНИЕ РАССМАТРИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В качестве расчетной системы выбран фрагмент электроэнергетической системы Таджикистана. Данные по 17 наиболее важным трансформаторам энергосистемы приведены в таблице 1.

В таблице 1 использованы следующие обозначения:

- Id – номер трансформатора,
- AT – автотрансформатор,
- Зобм – трехобмоточный трансформатор,
- ВН – номер узла высокого напряжения,
- СН – номер узла среднего напряжения,
- НН – номер узла низкого напряжения.

Таблица 1.

Используемые трансформаторы

Id	Тип	ВН	СН	НН
1	АТ	7	9	8
2	АТ	7	9	8
3	АТ	15	20	16
4	АТ	15	20	16
5	АТ	15	20	16
6	АТ	1	3	2
7	АТ	1	3	2
8	АТ	24	25	41
9	АТ	24	25	42
10	Зобм	4	6	5
11	Зобм	4	6	5
12	Зобм	21	23	22
13	Зобм	21	23	22
14	Зобм	11	18	45
15	Зобм	17	18	19
16	Зобм	17	18	19
17	Зобм	14	13	12

Все указанные трансформаторы имеют возможность регулирования напряжения посредством переключения РПН с 15 ступенями и шагом между коэффициентами 1.78. Сведения по узлам сети даны в таблице 2.

II. АЛГОРИТМ НАПРАВЛЕННОГО ПЕРЕБОРА

Рассматриваемая задача является комбинаторной задачей оптимизации. Общее число всевозможных решений-комбинаций задачи можно определить, исходя из количества регулируемых трансформаторов (17) и количества возможных положений анцапф (15). Общее число комбинаций составляет 15^{17} , то есть порядка 10^{20} . Очевидно, что применить полный перебор всех возможных комбинаций невозможно на практике. Применение метода ветвей и границ или симплекс-метода тоже не подходит для данной задачи, поскольку для рассматриваемой сети необходима громоздкая система дифференциальных уравнений, которая решается приближенно. Кроме того, данная комбинаторная задача относится к классу NP-полных, так как может быть сведена к задаче выполнимости булевых формул (SAT) [10]. Поэтому время, требуемое для ее точного решения, экспоненциально возрастает с увеличением числа трансформаторов.

Таблица 2.

Параметры напряжения, активной и реактивной мощностей в установившемся режиме.

№ п/п	U _{ном} , кВ	P, МВт	Q, МВар	№ п/п	U _{ном} , кВ	P, МВт	Q, МВар
1	230	179.5	134.6	25	115	0	0
2	11	28	19.6	30	11	-70	-46.1
3	115	163	117.4	31	11	-60	-39.5
4	115	0	0	32	230	0	0
5	11	0	0	33	230	0	0
6	38	18.5	12.9	34	230	0	0
7	230	109	76.3	35	230	0	0
8	11	0	0	36	230	0	0
9	115	0	0	37	230	0	0
10	230	-459	-302.7	38	230	0	0
11	230	0	0	39	230	0	0
12	7	4	2.4	40	230	0	0
13	38	12	8.4	41	11	-70	-24.5
14	230	0	0	42	11	-70	-46.1
15	230	0	0	43	230	0	0
16	11	14	9.8	45	11	-60	-29.9
17	230	0	0	44	230	0	0
18	38	45	30.1	46	230	0	0
19	11	15	9.3	47	230	0	0
20	115	124	86.8	48	115	0	0
21	115	0	0	49	115	0	0
22	11	8.4	6.3	50	115	0	0
23	38	20	13.6	51	115	0	0
24	230	0	0				

Необходимо применить метод, который, во-первых, находил бы решение за приемлемое время, во-вторых, позволил бы искать решения оптимизационной задачи, как черного ящика. Второе требование связано с высокой сложностью интеграции оптимизационных методов в математические модели, используемые для расчетов режимов электросетей. Для его выполнения можно использовать комплекс RastrWin, который позволяет выполнять расчет режима для заданных оптимизационным алгоритмом положений анцапф трансформаторов.

Простым в реализации, быстрым в расчетах и при этом обеспечивающим некоторый уровень повышения энергоэффективности системы является направленный перебор, организованный следующим образом [5].

1. Задается текущее положение анцапф всех регулируемых трансформаторов.

2. Пусть k – номер рассматриваемого трансформатора, начать с $k = 1$.

3. Если k не превышает число трансформаторов, то перейти к пункту 4. Иначе к пункту 6.

4. Выполняется расчет установившегося режима для всех 15 возможных положений анцапф трансформатора k . Положение, при

котором потери активной мощности в линиях сети наименьшие, сохраняется в качестве текущего положения.

5. $k = k + 1$. Перейти к пункту 3.

6. Если при выполнении пунктов 4 и 5 не было зафиксировано улучшение целевой функции, то завершить работу. Иначе перейти к пункту 2.

Алгоритм выполняет локальный поиск, перебирая все возможные положения анцапф каждого трансформатора по очереди. В случае, когда взаимное влияние трансформаторов мало, алгоритм может за 1-3 прохода по всем трансформаторам найти оптимальное или близкое к оптимальному решение. Но в противном случае, эффективность метода может оказаться невысокой из-за попадания в одни и те же локальные экстремумы на каждой итерации. Этот недостаток присущ и другим эвристическим методам, оптимизирующим части системы по-отдельности [2].

В работах [5, 7] показано, что данный алгоритм можно усовершенствовать, используя числа Фибоначчи, либо нечеткую логику. При этом снижается время работы алгоритма за счет сокращения перебираемых вариантов. Но качество получаемых решений остается таким же, как и у направленного

перебора. При этом для применения аппарата нечеткой логики сопряжено со значительными трудозатратами по составлению нечетких входных и выходных лингвистических переменных, и правил, описывающих выбор положений анцапф трансформаторов в той или иной ситуации [6]. Поэтому в данной работе прямое экспериментальное сравнение этих методов не проводится. Для экспериментов выбран более простой в реализации алгоритм направленного перебора, описанный выше. В качестве альтернативы рассмотрен метод, основанный на совершенно другом механизме, а именно алгоритм роя частиц.

III. АЛГОРИТМ РОЯ ЧАСТИЦ

Рассмотренный метод направленного перебора относится к жадным эвристическим методам, которые отличаются высокой скоростью работы, но сильно зависят от топологии задачи, начального приближения и эвристических правил [5, 10]. Поэтому решение, полученное жадным эвристическим методом может оказаться как оптимальным, так и очень далеким от оптимального в зависимости от перечисленных факторов [10]. Более сложными и эффективными являются стохастические алгоритмы глобальной оптимизации, такие как генетический алгоритм, алгоритм имитации отжига, роевой интеллект.

Алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization) был предложен в работе [11], затем усовершенствован авторами [12, 13] до версии, являющейся классической на сегодняшний день и в последующие годы развит до одного из наиболее популярных и эффективных методов решения задач оптимизации. Он относится к классу алгоритмов роевого интеллекта (Swarm Intelligence). Основой работы роевых алгоритмов является перемещения агентов-решений задачи в многомерном пространстве поиска решений с косвенным обменом опытом между ними [12, 14].

Алгоритм роя частиц успешно применяется в оптимизации систем электроснабжения, в задачах, связанных с распределенной генерацией и компенсацией реактивной мощности [9, 15, 16, 17].

Представим задачу оптимизации как задачу поиска минимума функции $f(X)$, где X – это вектор управляемых переменных. В данной работе вектор X задает номер анцапф

регулируемых трансформаторов с сети, а функция $f(X)$ определяет величину потерь активной мощности в ветвях сети. Имеется область допустимых значений в виде вектора $D = \{d_{1 \min}, d_{1 \max}, \dots, d_{s \min}, d_{s \max}\}$, где s является размерностью вектора X , то есть размерностью задачи.

Согласно схеме описания роевых алгоритмов, предложенной в [18], алгоритм роя частиц можно записать как кортеж $\{S, M, A, P, I, O\}$. Под S понимается набор агентов роя (частиц), под M средство косвенного обмена информацией между ними, под A – правила перемещения частиц, в которых используются эвристические коэффициенты из вектора P . Элементы I, O определяют входные и выходные потоки данных при реализации интерфейса между роевым алгоритмом и решаемой задачей.

Каждая частица роя из S характеризуется вектором координат X в пространстве D и значением критерия оптимальности $f(X)$. Количество частиц обозначим np . У каждой частицы есть своя переменная скорость, вектор V . Изначально значения элементов векторов X и V выбираются произвольно, $X \in D$ ($x_i \in [d_{i \min}, d_{i \max}]$, $i = 1, \dots, np$). Максимальные значения скоростей V ограничены вектором V_{max} . Затем на каждом шаге алгоритма векторы X и V для каждой частицы обновляются по следующим формулам [12, 13]:

$$\begin{aligned} V &= \omega V + \alpha_1 (Pb - X)R_1 + \alpha_2 (Gb - X)R_2 \\ \text{if}(v_i > v_{i \max}) : v_i &= v_{i \max} \\ \text{elseif}(v_i < -v_{i \max}) : v_i &= -v_{i \max}, i = 1, \dots, np \\ X &= X + V \\ \text{if}(x_i > d_{i \max}) : x_i &= d_{i \max} \\ \text{elseif}(x_i < -d_{i \max}) : x_i &= -d_{i \max}, i = 1, \dots, np \end{aligned} \quad (1)$$

где Pb – это позиция частицы с минимальным (наилучшим) значением $f(P)$ среди всех позиций, в которых она была,

Gb – позиция, аналогичная Pb , но для всех частиц роя, то есть самая лучшая позиция среди всех проверенных, именно Gb является средством косвенного обмена данными между агентами и содержит итоговое решение задачи, когда алгоритм завершается,

R_1 и R_2 – векторы вещественных случайных чисел, равномерно распределенных от 0 до 1 (на каждой итерации и для каждой частицы генерируется

новые случайные векторы). Размерности векторов равны размерности пространства поиска решений. В формуле (1) подразумевается поэлементное умножение компонент векторов.

Параметры α_1 и α_2 определяют степень притяжения частицы к индивидуальной лучшей позиции P и общей лучшей позиции G . Параметр ω характеризует инертность частиц. Вектор V_{max} ограничивает скорости частиц V . Таким образом, вектор параметров P состоит из $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, V_{max}\}$.

В данной работе границы скоростей частиц определяются следующим образом [19]:

$$V_{max} = \beta(D_{max} - D_{min})$$

где β представляет собой новый параметр алгоритма наряду с $\alpha_1, \alpha_2, \omega$. В классической версии PSO параметр β отсутствует как параметр, то есть всегда равен единице. Ограничение скорости снижает риск пропуска глобального оптимума без усложнения работы алгоритма. Таким образом, вектор параметров P состоит из $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ

При моделировании рассматриваемой энергосистемы был использован программный комплекс RastrWin (Екатеринбургский общественный фонд «Фонд им. Д.А. Арзамасцева»). Он является одним из самых функциональных и распространенных средств для расчетов режимов электросетей. Важным преимуществом RastrWin является применение макропрограммирования, реализованного на базе «Windows Scripting Host» (WSH). Макросы используются для автоматизации работы путем создания пользовательских подпрограмм на Visual Basic Script. Макросы задают последовательности команд, которые выполняет RastrWin, такие как получение или изменение параметров узлов и ветвей сети, расчет режимов. Для получения данных о сети необходимо выполнить такие команды:

```
set nodes = Rastr.Tables("node")
set nodes_voltage = nodes.Cols("vras")
set nodes_gen_p = nodes.Cols("pg")
set nodes_gen_q = nodes.Cols("qg")
```

```
set nodes_delta = nodes.Cols("delta")
```

Конкретное значение можно узнать или изменить:

```
v = nodes_voltage.z(i)
nodes_voltage.z(i) = v
```

Согласно интерфейсу между алгоритмами роевого интеллекта и решаемыми задачами [18], необходимо определить способ расчета целевой функции $f(X)$, где X – позиция некоторого агента (частицы). Для вычисления целевой функции в RastrWin необходимо выполнить расчет режима через команду *rastr.rgm(“”)*. Функция вернет код ошибки в случае недопустимых параметров сети, что используется для отсеивания недопустимых решений.

Необходимо выполнить переход от позиции агента X к положениям анцапф трансформаторов. Учитывая, что для единообразия все элементы вектора X являются вещественными числами от 0 до 1, получим, что для случая n трансформаторов и m возможных положений анцапф переход можно осуществить так:

```
id_anci = round(xi / m) + 1, i = 1, ... n,
```

где *round(.)* – округление в меньшую сторону.

Задав для всех трансформаторов полученные позиции, нужно запустить расчет *rastr.rgm(“”)*, проверить сходимость режима и просуммировать потери активной мощности в ветвях сети. Полученная сумма принимается за значение $f(X)$ и передается в алгоритм роевого интеллекта. Эти шаги выполняются для каждого агента на каждой итерации алгоритма. После выполнения расчета режима необходимо вернуть исходные значения напряжений, мощностей генерации и расчетных углов напряжений во все узлы сети. Иначе предыдущие проверенные решения могут влиять на последующие.

Направленный перебор выполнялся от первого трансформатора к 17-му, и затем от 17 к первому. Два запуска выполнялись, чтобы продемонстрировать зависимость метода от начального приближения.

Недостатком алгоритма роя частиц является зависимость от значений

используемых параметров $\{\alpha_1, \alpha_2, \omega, \beta\}$. При этом теоретически невозможно выбрать универсальные значения, эффективные для всех задач. Это подтверждается практикой [19, 20], и имеет обоснование согласно No-Free-Lunch теореме [21]. Для алгоритма роя частиц было взято несколько наборов параметров, рекомендованных для широкого класса задач [13, 19, 20]:

$$\alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.5, \omega = 0.7, \beta = 0.1.$$

$$\alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.5, \omega = 0.7, \beta = 0.3$$

$$\alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.5, \omega = 0.7, \beta = 1.$$

Отличия значений β объясняются тем, что для параметров $\alpha_1 = 1.5, \alpha_2 = 1.5, \omega = 0.7$ хорошая эффективность может быть получена и без ограничений скорости. В то же время, ограничение теоретически должно повышать качество получаемых решений, поэтому взято значение 0.3, показавшее высокую эффективность в исследовании [19] и значение 0.1, так как дальнейшее снижение максимальной скорости может негативно сказаться на способности алгоритма выходить из локальных экстремумов. Число частиц было выбрано равным 50, а число итераций 50 и 500.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментов для модели рассмотренной электросети приведены в таблице 3. В строках с обозначениями $Id_{анц}$

приведены рекомендованные разными алгоритмами положения анцапф. Строка «Потери, МВт» содержит потери активной мощности в линиях. Строка «Эффект, МВт» показывает насколько потери снизились в результате оптимизации. Поскольку направленный перебор выполнялся в первый раз начиная с первого трансформатора, затем во второй с семнадцатого, результаты приведены в двух разных столбцах (НП 1, НП 17, соответственно). Для алгоритма роя частиц (PSO) указано число шагов алгоритма и значение варьируемого параметра, ограничивающего скорости частиц, β .

Алгоритм направленного перебора сходиллся уже после 4-х обходов всех трансформаторов. Полученные различия в результатах одного алгоритма показывают, насколько направленный перебор, как и любой жадный эвристический алгоритм зависит от факторов, напрямую не имеющих отношения к задаче. Это связано с попаданием алгоритма в различные локальные экстремумы, в зависимости от порядка обхода управляемых переменных. Видно, что при разных направлениях перебора эффект от оптимизации меняется в 2.3 раза. Тем не менее, даже такой простой способ оптимизации способен сэкономить значительное количество мощности без каких-либо затрат, кроме создания модели сети для ее расчетов.

Таблица 3.

Параметры напряжения, активной и реактивной мощностей в установившемся режиме

Алгоритм	Текущее положение	НП 1	НП 17	PSO 50 шагов, $\beta = 0.1$	PSO 500 шагов, $\beta = 0.1$	PSO 50 шагов, $\beta = 0.3$	PSO 500 шагов, $\beta = 0.3$	PSO 50 шагов, $\beta = 1.0$	PSO 500 шагов, $\beta = 1.0$
Потери, МВт	48.01	46.32	47.28	46.08	45.90	45.88	45.83	46.23	46.21
Эффект, МВт	0	1.69	0.73	1.93	2.11	2.13	2.18	1.78	1.80
$Id_{анц} 1$	2	11	2	9	10	10	8	11	10
$Id_{анц} 2$	2	6	2	9	8	10	8	8	8
$Id_{анц} 3$	6	10	6	11	12	14	10	12	11
$Id_{анц} 4$	6	7	11	8	11	14	10	12	16
$Id_{анц} 5$	6	10	10	10	12	14	10	12	10
$Id_{анц} 6$	6	6	6	9	10	9	8	7	5
$Id_{анц} 7$	6	6	6	8	9	8	7	8	16
$Id_{анц} 8$	6	7	10	10	10	12	10	10	11
$Id_{анц} 9$	6	10	7	10	11	8	10	7	11
$Id_{анц} 10$	2	2	2	6	10	4	9	9	8
$Id_{анц} 11$	2	2	2	9	10	4	7	9	10
$Id_{анц} 12$	6	6	6	8	7	8	9	2	10
$Id_{анц} 13$	6	6	6	10	7	8	8	2	10
$Id_{анц} 14$	6	10	6	11	12	6	10	7	10
$Id_{анц} 15$	6	7	4	6	10	4	6	8	16
$Id_{анц} 16$	6	6	5	7	10	4	16	7	8
$Id_{анц} 17$	6	12	12	8	8	11	4	2	16
Среднее $Id_{анц}$	5	7	6	9	10	9	9	8	11

Алгоритм роя частиц показал более высокую эффективность, чем направленный перебор при использовании всего лишь 50 итераций.

Нужно отметить, что эксперименты с 50 и 500 итерациями выполнялись как 2 различных запуска. Без ограничения максимальной скорости эффективность алгоритма роя существенно ниже, а выбор значения коэффициента β равным 0.3 дал наилучшие результаты. Можно сделать вывод, что без ограничения максимальной скорости ($\beta = 1.0$) частицы часто «пролетают» мимо окрестности наиболее низких экстремумов, и даже попав в них, могут по инерции выйти обратно. При этом слишком сильное ограничение скорости ($\beta = 0.1$) ухудшает время поиска эффективного решения, отсюда значительная разница в решениях при 50 и 500 итерациях.

VI. ВЫВОДЫ

Таким образом, наилучшее решение по снижению потерь активной мощности в системе достигается с помощью алгоритма роевого интеллекта. При оптимизации с использованием метода роевого интеллекта в рассматриваемой сети можно добиться снижения потерь активной мощности с 48.01 МВт до 45.83 МВт, т.е. на 2.18 МВт или 4.5%. Эта величина снижения потерь активной мощности обеспечивает экономию 19 миллионов рублей ежегодно.

В наилучшем решении среднее положение анцапф оказалось равным 9. Хотя, априори можно было предположить, что это значение должно быть близким к максимальному значению 16, поскольку потери активной мощности снижаются с ростом напряжения. Такое предположение может быть справедливым для радиальных сетей, в которых взаимные влияния различных сегментов сети слабые. Для рассмотренной не радиальной сети это предположение опровергнуто проведенным экспериментом.

Показано, что применение алгоритма роя частиц эффективнее и проще в реализации, чем метода направленного перебора и метода, основанного на эвристических правилах с использованием нечеткой логики. Алгоритм роя частиц может давать удовлетворительные решения и без настройки параметров. Тем не менее, показано, что правильный выбор значения параметра, ограничивающего

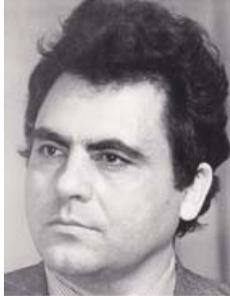
скорости частиц, может дать дополнительный прирост качества решений.

Литература (References)

- [1] Quevedo J., Cazakevicius F.E., Beltrame R.C. Analysis and Design of an Electronic On-Load Tap Changer Distribution Transformer for Automatic Voltage Regulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, iss. 1, pp. 883-894. doi: 10.1109/TIE.2016.2592463.
- [2] Robbins B.A., Zhu H., Domínguez-García A.D. Optimal Tap Setting of Voltage Regulation Transformers in Unbalanced Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, iss. 1, pp. 256-267. doi: 10.1109/TPWRS.2015.2392693.
- [3] Huang S., Pillai J.R., Liserre M., Bak-Jensen B. Improving photovoltaic and electric vehicle penetration in distribution grids with smart transformer. *Proc. Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES*, 6-9 Oct. 2013. doi: 10.1109/ISGTEurope.2013.6695282.
- [4] Kekatos V., Zhang L., Giannakis G.B., Baldick R. Voltage Regulation Algorithms for Multiphase Power Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, vol. 31, iss. 5, pp. 3913 – 3923. doi: 10.1109/TPWRS.2015.2493520.
- [5] Manusov V.Z., Sidorkin Y.M. Манусов В. З. Metod optimizatsii koefitsientov transformatsii [Method of optimization of transformer coefficients]. *Regimy elektricheskikh setei I system – Regimes of electrical network and systems*, Novosibirsk, 1974. pp. 51-56.
- [6] Spatti D.H., Da Silva I.N., Usida W.F., Flauzino R.A. Fuzzy Control System for Voltage Regulation In Power Transformers. *IEEE Latin America Transactions*, 2010, vol. 8, iss. 1, pp. 51-57. doi: 10.1109/TLA.2010.5453946.
- [7] Zhmak E. I., Manusov V.Z. Obosnovanie principa nechetkogo regulirovanija naprjazhenija s pomoshh'ju RPN transformatorov [Substantiation of the principle of fuzzy voltage regulation by means of transformers with voltage regulation] *Elektroenergetika – Power engineering*, Novosibirsk, 2002. pp. 32-34.
- [8] Keller J.M., Liu D., Fogel D.B. *Collective Intelligence and Other Extensions of Evolutionary Computation*. Wiley-IEEE Press, 2016. 400 p. doi: 10.1002/9781119214403.ch13.
- [9] Manusov, V., Matrenin, P., Kokin, S. Swarm intelligence algorithms for the problem of the optimal placement and operation control of reactive power sources into power grids. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2017, vol. 12, iss. 1, pp. 101-112. doi:10.2495/DNE-V12- N1-101- 112.

- [10] Skiena S. *The Algorithm Design Manual*. London, 2008. 730 p.
- [11] Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. *Proc. of IEEE International Conference on Neural Network*, 1995, pp. 1942-1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [12] Eberhart R., Shi Y., Kennedy J. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001. 512 p.
- [13] Eberhart R.C., Shi Y., "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in *Proc. Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 81-86, 2001. doi: 10.1109/CEC.2001.934374.
- [14] Zhu Y. Tang X. Overview of swarm intelligence. *Computer Application and System Modeling*, 2010, vol. 9, pp. 400-409.
- [15] Lal V.N., Singh S.N. Modified particle swarm optimization-based maximum power point tracking controller for single-stage utility-scale photovoltaic system with reactive power injection capability. *IET Renewable Power Generation*, 2017, vol 10, iss. 7, pp. 899-907. doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0346.
- [16] Jamian J.J., Mustafa M.W., Mokhlis H., Baharudin M.A. A New Particle Swarm Optimization Technique in Optimizing Size of Distributed Generation. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012, vol. 1, № 1, pp. 137-146.
- [17] Karimyan P., Abedi M., Hosseinian S.H., Khatami R. Stochastic approach to represent distributed energy resources in the form of a virtual power plant in energy and reserve markets. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, vol. 10, iss. 8, 5, 19, pp. 1792-1804. doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0715.
- [18] Matrenin P.V., Sekaev V.G. Sistemnoe opisaniye algoritmov roevogo intellekta [Systems approach to swarm intelligence] *Programmaia inzheneria – Software engineering*, 2013, no.12, pp. 39-45. (In Russian).
- [19] Matrenin P.V., Sekaev V.G. Particle Swarm optimization with velocity restriction and evolutionary parameters selection for scheduling problem. *Proc. Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference*, 2015. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147143
- [20] Pedersen M., Chippereld A. Simplifying Particle Swarm Optimization. *Applied Soft Computing*, 2010, vol. 10, issue 2, pp. 618-628.
- [21] Wolpert D.H., Macready W.G., No Free Lunch Theorems for Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, vol. 1(1), pp.67-82.

Сведения об авторах.



Вадим Зиновьевич Манусов, доктор технических наук, профессор. Закончил Новосибирский электротехнический институт в 1963 г. Доктор технических наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: применение ИИ для анализа и оптимизации систем электроснабжения.

E-mail: manusov@mail.ru



Павел Викторович Матренин, аспирант. Закончил магистратуру Новосибирского государственного технического университета в 2014 г. Области научных интересов: стохастические алгоритмы оптимизации, проектирование и разработка информационных систем.

E-mail: pavel.matrenin@gmail.com



Орлов Дмитрий Викторович, магистрант. Закончил Омский государственный технический университет в 2016 г. Область научных интересов: оптимизация электротехнических систем, сети электроснабжения.

E-mail: 4eel@inbox.ru