

УДК 621.316.11

T. M. ХАЛИЛ СЕЛИМ – Ph.D., Senior Electrical Engineer, Saudi Electricity Company, Saudi Arabia, tamerm1@yahoo.com

A. B. ГОРПИНИЧ – к.т.н., доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gorpinich@iee.org

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И СТРУКТУРЫ РЕАЛЬНОЙ РАЗВЕТВЛЁННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ

Для снижения потерь электроэнергии (ЭЭ) в распределительных сетях (РС), как правило, применяют мероприятия по улучшению режимов и мероприятия по реконструкции, причём реконструкция обычно приводит к сопутствующему снижению потерь, так как её проводят исходя из рассмотрения комплекса условий, в которых уровень потерь ЭЭ является только одним из параметров и, в большинстве случаев, не определяющим [1].

Одними из наиболее эффективных мероприятий по снижению потерь ЭЭ в РС являются установка устройств компенсации реактивной мощности (КРМ), реконфигурация и замена сечений проводников на перегруженных по экономическим условиям участках. Следует отметить, что применение этих мероприятий приводит не только к снижению потерь ЭЭ и увеличению пропускной способности РС, но и к нормализации качества напряжения в узлах нагрузки.

Установка устройств КРМ в реальной разветвлённой РС с большим количеством узлов приводит к перераспределению потоков реактивной мощности по линиям, причём её изменение на каждом участке определяется компенсирующими устройствами (КУ), установленными во всех узлах, так как установка КУ в одном узле изменяет показатели эффективности их установки в других узлах. В этом случае ставится задача определения оптимального сочетания

мощности и мест установки КУ, обеспечивающих минимум суммарных затрат.

Однако затраты на КУ имеют нелинейную зависимость от их мощности. КУ имеют дискретную шкалу мощностей с достаточно большим шагом. Кроме того, при выборе оптимальной мощности КУ необходимо учитывать не только влияние на потери ЭЭ, но и изменение пропускной способности проводников, уровней напряжения в узлах нагрузки, показателей качества электроэнергии и т.д.

Мероприятия по реконфигурации РС, которые осуществляются путём проведения переключений в определённых местах схемы, обеспечивающих снижение потерь ЭЭ за счёт перераспределения её потоков по линиям, и замене сечений проводников на перегруженных по экономическим условиям участках необходимо выполнять с учётом изменения нагрузки во времени, радиальной топологии РС и ряда других эксплуатационных ограничений.

Таким образом, в реальной разветвлённой РС с большим количеством узлов применение мероприятий по КРМ, реконфигурации и замене сечений проводников на перегруженных по экономическим условиям участках, а тем более совместное их использование, приводит к проблеме сложной многокритериальной нелинейной оптимизации с ограничениями в виде равенств и неравенств. В настоящее время для её решения чаще всего применяют эвристиче-

ские методы и методы искусственного интеллекта.

Цель работы – представить селективный метод роя частиц (СМРЧ) и результаты его применения для совместной оптимизации мест установки и мощности батарей конденсаторов (БК), конфигурации и сечений проводников действующей схемы электропитания восточной части г. Мариуполя, содержащей 3 подстанции, 37 фидеров, 274 узла нагрузки, 284 ветви и 11 нормально разомкнутых коммутационных аппаратов (НРКА).

Метод роя частиц – это стохастический оптимизационный алгоритм, моделирующий социальное поведение птиц в стае, косяков рыб или роя пчёл и методы, с помощью которых птицы летают (рыбы плавают) синхронно и умеют менять направление движения с перегруппировкой в оптимальные формации, находят источники пищи, спасаются от хищников и т.д. В МРЧ агентами являются «частицы», которые отражают возможные решения проблемы. Каждая частица перемещается в многомерном пространстве решений со скоростью, которая постоянно обновляется на основе собственного опыта и опыта соседей. Текущее состояние частицы характеризуется координатами в пространстве решений, а также вектором скорости перемещения. Оба этих параметра генерируются случайным образом на этапе инициализации. Кроме того, каждая частица хранит координаты лучшего из найденных ею решений (particle best), а также лучшее из пройденных всеми частицами решений (global best) – этим имитируется мгновенный обмен информацией между частицами. МРЧ был разработан на основе следующей модели [2]:

- 1) когда, к примеру, одна из птиц достигает цели (допустим, обнаруживает пищу, что соответствует максимуму целевой функции), она мгновенно передаёт эту информацию всем другим птицам;

- 2) все другие птицы тоже стремятся достичь цели (обнаружить пищу), но каждая из них двигается к намеченной цели своим путём;
- 3) присутствует элемент собственного независимого мышления у каждой из птиц, так же как и память.

Таким образом, модель симулирует случайный поиск (ведь источники пищи обычно расположены случайным образом) в выбранном пространстве с целью достижения максимального значения целевой функции. По сути, мало-помалу после многих итераций птицы достигают цели (или максимума целевой функции).

МРЧ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими современными методами оптимизации:

- 1) низкая алгоритмическая сложность – МРЧ легко реализуется с помощью любого высокоуровневого языка программирования;
- 2) при использовании МРЧ требуется меньше параметров (операторов алгоритма), которые необходимо регулировать;
- 3) МРЧ характеризуется повышенными когнитивными возможностями в плане хранения решений, так как каждая частица помнит о лучшем из найденных ею решений и лучшем из пройденных всеми частицами решений;
- 4) МРЧ обладает более высокой эффективностью поддержания разнообразия набора потенциальных решений (популяции роя), так как все частицы используют информацию о наилучшем решении для корректировки своего текущего состояния в сторону улучшения.

Первоначальная версия МРЧ предназначалась для решения проблем только нелинейной непрерывной оптимизации. Впоследствии появились различные модификации классической версии МРЧ, которые существенно расширили его возможности в

решении широкого класса сложных инженерных и научных оптимизационных задач.

Классический алгоритм роя частиц для оптимизации непрерывных нелинейных функций предложили Kennedy и Eberhart в 1995 г. [3]. Рассмотрим основные положения классического МРЧ.

1. Каждая частица в рое в результате итераций постоянно обновляет своё состояние с учётом четырёх факторов: своей текущей позиции X_i , своей текущей скорости перемещения Vel_i , своей наилучшей позиции PB (particle best) и наилучшей позиции, достигнутой среди всех частиц, – наилучшей глобальной позиции GB (global best).
2. Пусть пространство решений S является d -мерным и позиция каждой частицы i характеризуется d -мерным вектором $X_i = [x_{i1}, x_{i2} \dots x_{id}]$.
3. Количество частиц в рое, который называется «популяцией», обозначим через n . Популяцию можно представить как $pop = [X_1, X_2 \dots X_n]$.
4. Пусть $PB_i = [pb_{i1}, pb_{i2} \dots pb_{id}]$ – наилучшая позиция каждой частицы (particle best), $GB = [gb_1, gb_2 \dots gb_d]$ – наилучшая глобальная позиция для всего роя (global best), $Vel_i = [v_{i1}, v_{i2} \dots v_{id}]$ – скорость перемещения каждой частицы в d -мерном пространстве решений.
5. На итерации k скорость частицы обновляется с помощью выражения:

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gb_d^k - x_{id}^k), \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$, а n – размер популяции; c_1 и c_2 – постоянные, характеризующие ускорение; r_1 и r_2 – две случайные величины в диапазоне $[0, 1]$.

6. Позиция частицы обновляется с помощью выражения:

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}. \quad (2)$$

Уравнение (1) содержит три составляющие:

- 1) инерционную – она моделирует стремление частицы продолжить движение в том же направлении поиска (в последующих модификациях классического алгоритма эта составляющая масштабируется с помощью специальной постоянной);
- 2) когнитивную $(pb_{id}^k - x_{id}^k)$, которая отражает собственный опыт (накопление знаний) частицы о наилучшем решении;
- 3) социальную $(gb_d^k - x_{id}^k)$, которая характеризует коллективное знание всего роя о наилучшем решении.

Таким образом, уравнение (1) применяется для расчёта обновлённой скорости частицы с учётом её предыдущей скорости и расстояний между её текущей позицией, своей наилучшей позицией (свой собственный опыт о наилучшем решении) и наилучшей глобальной позицией (коллективный опыт о наилучшем решении). После этого частица перемещается по направлению к новой позиции в соответствии с уравнением (2). Эффективность функционирования каждой частицы оценивается с помощью предварительно сформулированной фитнес-функции (функции приемлемости решения), которая устанавливает связь между решаемой проблемой и алгоритмом оптимизации. На рис. 1 показана концепция модификации точек поиска [4, 5].

Из уравнений (1), (2) и рис. 1 становится понятно, что алгоритм роя частиц функционирует путём регулирования расстояний (скорости), на основании которых каждая частица двигается в каждом d -мерном гиперпространстве поиска решений проблемы. Скорости частиц ограничиваются максимально допустимой скоростью Vel_{\max} , что позволяет контролировать глобальную способность всего роя тщательно исследовать пространство поиска.

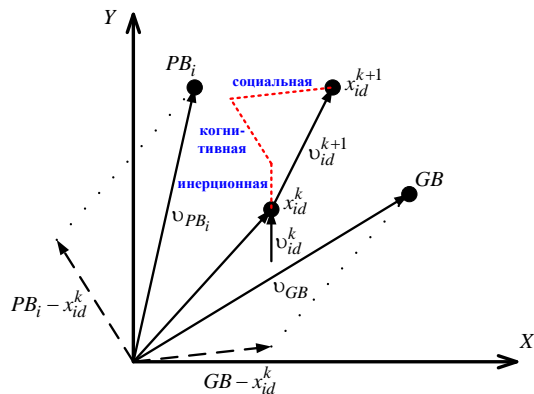


Рис. 1. Концепция модификации точек поиска:

x_{id}^k – текущая точка поиска; x_{id}^{k+1} – модифицированная точка поиска; v_{id}^k – текущая скорость; v_{id}^{k+1} – модифицированная скорость; v_{PB_i} – скорость на основании PB_i ; v_{GB} – скорость на основании GB

Эмпирические исследования МРЧ показали, что даже когда максимальная скорость и постоянные ускорения выбраны правильно, всё же может наблюдаться явление, известное как «взрыв» роя (уход частиц в бесконечность), т.е. расходимость алгоритма (стремительный рост числа возможных вариантов решения проблемы). В исследовательских работах предложены два основных метода контроля этого «взрыва» роя [6]. Первый метод предполагает использование так называемого «коэффициента инерции» (inertia weight), который предложили Shi и Eberhart [7, 8], второй – «коэффициента сжатия» (constriction factor), который предложили Clerc и Kennedy [9].

Модификация классического МРЧ, основанная на использовании коэффициента инерции, которую предложили Shi и Eberhart в 1998 г. [7], позволяет решить проблему баланса между тщательностью исследования пространства поиска и скоростью сходимости алгоритма. Авторы отметили, что в зависимости от поставленной задачи и параметров пространства поиска этот баланс должен быть различным, поэтому они ввели коэффициент инерции в правило обновления скорости частицы на итерации k :

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(gb_d^k - x_{id}^k), \quad (3)$$

где w – коэффициент инерции (весовая доля инерции).

При $w > 1$ скорости частиц возрастают, они разлетаются в стороны и исследуют пространство поиска более тщательно. При $w < 1$ скорости частиц со временем убывают и скорость сходимости алгоритма в этом случае зависит от выбора постоянных c_1 и c_2 .

Shi и Eberhart также отметили [7], что коэффициент инерции не обязательно должен быть постоянным: в процессе работы алгоритма он может изменяться по линейному и даже нелинейному закону. В работе [8] и более поздних работах они чаще всего использовали линейный закон убывания как достаточно эффективный и вместе с тем простой. Тем не менее, разрабатывались и успешно применялись и другие законы изменения коэффициента инерции. Значение коэффициента инерции может как убывать, так и расти. При его убывании частицы сначала исследуют пространство поиска экстенсивно, находя множество субоптимальных решений, а со временем всё больше концентрируются на исследовании их окрестностей. Возрастание коэффициента инерции способствует сходимости алгоритма на поздних стадиях работы.

Clerc и Kennedy в 2002 г. на основании анализа математических аспектов классического МРЧ для гарантирования его сходимости предложили свою модификацию с использованием коэффициента сжатия [9]. Эта модификация классического МРЧ стала настолько популярной, что теперь её принято называть «каноническим методом роя частиц». Она позволяет избавиться от необходимости «угадывать» подходящие значения регулируемых параметров алгоритма, контролируя его сходимость. Если принять $\varphi = c_1 + c_2$ и представить коэффициент сжатия в виде

$$\chi = \begin{cases} \frac{2K}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}}, & \text{если } \varphi > 4 \\ K & \text{в другом случае} \end{cases}, (4)$$

где K – положительная постоянная, то правило обновления скорости частицы на итерации k после введения коэффициента сжатия будет выглядеть следующим образом:

$$v_{id}^{k+1} = \chi \left(v_{id}^k + c_1 r_1 (pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gb_d^k - x_{id}^k) \right). (5)$$

Таким образом, канонический МРЧ гарантирует сходимость алгоритма без необходимости явно контролировать скорость частиц.

Следует отметить, что в научной литературе постоянно предлагаются новые модификации МРЧ, позволяющие улучшить его эффективность. Существуют две основные тенденции в таких работах: адаптация параметров МРЧ в процессе оптимизации и разработка гибридных методов оптимизации на основе объединения МРЧ с другими алгоритмами искусственного интеллекта [10]. Например, гибридный МРЧ, объединяющий механизм селекции методов эволюционного программирования и МРЧ, представлен в [11]. Miranda и Fonseca разработали «эволюционный» МРЧ, представляющий собой комбинированный самонастраивающийся адаптивный алгоритм, объ-

единяющий эволюционные стратегии и МРЧ [12-14]. Можно отметить и работы [15] и [16], в которых авторы используют гибридные методы оптимизации на основе объединения МРЧ и методов нечёткой логики.

Общие принципы, которые заложены в методы оптимизации, изначально предназначенные для решения задач в векторном пространстве из действительных величин (как, например, классический МРЧ), могут быть использованы и для решения задач в векторном пространстве из дискретных величин. Наиболее распространённой формой дискретной оптимизации является бинарная оптимизация, при которой все элементы пространства решений могут состоять только из значений 0 или 1, в то время как в более общем случае все элементы пространства решений могут состоять из m различных неупорядоченных значений, где m – любое целое число, которое больше 1. Проблема бинарной оптимизации – это проблема оптимизации, при которой пространство решений S представляет набор из битовых строк (строк, состоящих из нулей и единиц) заданной фиксированной длины n .

Бинарный МРЧ Kennedy и Eberhart представили в 1997 г. [17]. Этот метод базируется на очень простой модификации классического МРЧ, оперирующего с действительными величинами. Как и в классическом МРЧ, сперва необходимо сформулировать фитнес-функцию F , устанавливающую связь между решаемой проблемой и алгоритмом бинарного МРЧ. В данном случае она устанавливает связь между d -мерным бинарным пространством поиска B^d (набором из битовых строк длины d) и действительными числами. Таким образом, в бинарном МРЧ позиции частиц должны принадлежать пространству поиска B^d , чтобы их можно было оценить с помощью фитнес-функции F . Это достигается путём использования сигмоидального преобразования скорости частицы, позволяющего заставить скорости изменяться в диапа-

зоне $[0,1]$, а елементи простору рішення приймають значення 0 або 1. При цьому сигмоїдальна функція, яка зазвичай застосовується в штучних нейронних мережах, має такий вигляд [10]:

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^{k+1})}, \quad (6)$$

а рівняння (2) для оновлення позиції частинки перетворюється до вигляду:

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \text{rand} < \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \\ 0 & \text{в іншому випадку} \end{cases}. \quad (7)$$

В більш загальному випадку, якщо необхідно отримати цілочислене рішення (не обов'язково в вигляді значень 0 або 1), це можна зробити, округляючи оптимальні значення до найближчих цілих [18]. Рівняння (1) і (2), розроблені для простору рішень з дійсних чисел, використовуються для визначення нової позиції кожної частинки. Як тільки отримано значення x_i в складі якого-небудь d -мерного вектора, воно округляється до найближчого цілого, використовуючи функцію виділення цілої частини з дійсного числа [18]. Результати, отримані Laskari і др. [19] з допомогою цілочисленого МРЧ, показали, що ефективність методу не зменшується при виділенні цілої частини з дійсних значень.

В більшості інженерних застосувань при розв'язанні проблем неперервної або дискретної оптимізації дуже часто потрібно оновлювати змінні стану до стандартних значень (наприклад, до стандартних значень сечень провідників або потужностей БК, використовуваних для КРМ). Авторами запропоновано «селективний» метод роя частинок, який представляє собою просту модифікацію бінарного МРЧ, яка може бути використана в інженерній практиці для пошуку оптимальних варіантів в ситуаціях, коли простір рішень складається з специфічних величин [20]. В відмінність від класичного МРЧ, в якому простір пошуку складається

дійсних чисел, і бінарного МРЧ, в якому простір пошуку складається тільки з значень 0 або 1, в СМРЧ простір пошуку представляє набір вибраних змінних, причому воно може відрізнятися між d -мерними векторами.

В СМРЧ простір пошуку для кожного d -мерного вектора $S_d = [s_{d1}, s_{d2}, \dots, s_{dn}]$ представляє набір з dn позицій, де dn – кількість вибраних позицій для d -мерного вектора. Як і в класичному і бінарному МРЧ, в СМРЧ спершу необхідно сформулювати функцію F і визначитися з d -мерними векторами. Однак відмінність полягає в тому, що в даному випадку функція F встановлює зв'язок між розв'язуваною проблемою і кожним d -мерним вектором з dn величин, які відображають простір пошуку S_d з вибраних змінних. Іншими словами, позиція кожної частинки перетворюється з точки бінарного простору або простору дійсних чисел в точку простору з вибраних змінних. Для цього необхідно перетворити сигмоїдальну функцію (рівняння (6)) до вигляду:

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = dn \frac{1}{1 + \exp(-v_{id}^{k+1})}, \quad (8)$$

а координата i кожної позиції частинки для даного d -мерного вектора буде являтися вибраною змінною, оновлюючи яку можна з допомогою виразу

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} s_{d1}, & \text{якщо } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 1 \\ s_{d2}, & \text{якщо } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 2 \\ s_{d3}, & \text{якщо } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < 3 \\ \dots & \\ s_{dn}, & \text{якщо } \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) < dn \end{cases}, \quad (9)$$

де $s_{d1}, s_{d2}, s_{d3}, \dots, s_{dn}$ – вибрані змінні в d -мерному векторі.

Значення швидкостей обмежуються деякими мінімальними і максимальними

ми величинами $[Vel_{\min}, Vel_{\max}]$ с помощью выражения

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} Vel_{\max}, & \text{если } v_{id}^{k+1} > Vel_{\max} \\ v_{id}^{k+1}, & \text{если } |v_{id}^{k+1}| \leq Vel_{\max} \\ Vel_{\min}, & \text{если } v_{id}^{k+1} < Vel_{\min} \end{cases} \cdot (10)$$

Чтобы избежать постоянного значения скорости для каждой итерации и заставить частицу перемещаться в пространстве поиска, необходимо использовать выражение:

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} rand \times v_{id}^{k+1}, & \text{если } |v_{id}^{k+1}| = |v_{id}^k| \\ v_{id}^{k+1} & \text{в другом случае} \end{cases} \cdot (11)$$

Таким образом, чтобы применить СМРЧ для решения оптимизационной задачи, необходимо выполнить следующие этапы: 1) определить количество d -мерных векторов; 2) найти для каждого из них пространство поиска; 3) выбрать оптимальное решение среди пространств поиска для каждого

d -мерного вектора, используя последовательно уравнения (3), (10), (11), (8) и (9).

Для верификации СМРЧ были использованы многочисленные тестовые и реальные схемы с различным количеством узлов (табл. 1). Путём сравнения СМРЧ с другими методами оптимизации (эвристические алгоритмы (ЭА), имитация отжига (ИО), генетические алгоритмы (ГА), муравьиные алгоритмы (МА), нечёткая логика и т.д.) было установлено, что СМРЧ позволяет получить похожие или даже несколько лучшие результаты.

После верификации СМРЧ было принято решение применить его для совместной оптимизации мест установки и мощности БК, конфигурации и сечений проводников действующей схемы электроснабжения Орджоникидзевского участка МРЭС г. Мариуполя, содержащей 3 подстанции, 37 фидеров, 274 узла нагрузки, 284 ветви и 11 НРКА.

Таблица 1

Результаты верификации СМРЧ

№ п/п	Количество узлов	Метод снижения потерь ЭЭ	Метод оптимизации	Сравниваемый показатель	Результаты, полученные с помощью других методов, %	Результаты, полученные с помощью СМРЧ, %
1	9	Установка БК	ЭА [21]	Чистые сбережения	9,24	10,89
2	9	Установка БК	Метод полного перебора [22]	Чистые сбережения	13,45	13,53
3	33	Реконфигурация	ГА [23]	Снижение потерь	31	31
4	69	Реконфигурация	Нечёткая логика [24]	Снижение потерь	56	56
5	16	Установка БК и реконфигурация	ИО [25] ГА [25] МА [25]	Снижение потерь	12,34 12,36 12,38	12,73
6	83	Установка БК и реконфигурация	ИО [25] ГА [25] МА [25]	Снижение потерь	41,9 44,48 44,5	44,55
7	27	Установка БК и замена сечений проводников	ГА [26]	Снижение потерь	46,5	47

Упрощённая однолинейная схема, параметры линий и данные о нагрузках, а также принятые при моделировании допущения приведены в [27]. Для подтверждения и уточнения этих допущений в рассматриваемой сети 6 кВ были проведены длительные (в течение одной недели) измерения активной и реактивной мощности, несинусоидальности и несимметрии напряжений, коэффициента мощности и других показателей, выполненные с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke 435 на четырёх присоединениях подстанции «Город-4» с максимальными потерями ЭЭ и отклонениями напряжения. Суммарные потери мощности, потери ЭЭ и потребляемая мощность при разных уровнях нагрузки, полученные до оптимизации с учётом принятых допущений, представлены в [27].

Для реализации СМРЧ была разработана специальная программа в среде MATLAB R2010a. Были рассмотрены следующие варианты оптимизации:

- а) только установка БК;
- б) только замена сечений проводников;
- в) только реконфигурация;
- г) совместная оптимизация мест установки и мощности БК, конфигурации и сечений проводников, однако без учёта ограничения на предельное значение коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах;
- д) совместная оптимизация мест установки и мощности БК, конфигурации и сечений проводников с учётом ограничения на предельное значение коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах.

В общем случае целевая функция была сформулирована следующим образом: необходимо выбрать решение, обеспечивающее минимальные ежегодные затраты с учётом ряда ограничений в виде равенств и неравенств, накладываемых на предельно допустимые уровни напряжений и коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах, степень КРМ (суммарная генерация реактивной мощно-

сти в сеть не должна превышать суммарной реактивной мощности нагрузки), максимально допустимую пропускную способность проводников и т.д.

$$F = K^n \Delta P_l + K^3 \sum_{l=1}^L \Delta P_l T_l + \sum_{b=1}^B K_b^{np} L_b + K^{бк}; \quad (12)$$

$$\Delta P_l = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{b=1}^B \Delta P_{hbl} \right); \quad (13)$$

$$K^{бк} = \sum_{j \in S_c} \left(k_f^{бк} u_{fjl} + k_s^{бк} u_{sjl} \right), \quad (14)$$

где F – функция ежегодных затрат, \$; K^n – эквивалентная ежегодная стоимость потерь активной мощности, \$/кВт; K^3 – эквивалентная ежегодная стоимость потерь ЭЭ, \$/кВт·ч; ΔP_l и ΔP_1 – соответственно суммарные потери активной мощности с учётом высших гармоник (ВГ) при уровне нагрузки l и в режиме максимальных нагрузок (рассчитываются по выражению (13) при $l=1$), кВт; L – количество уровней нагрузки; T_l – продолжительность уровня нагрузки l , ч; ΔP_{hbl} – потери активной мощности в ветви b на частоте h -й гармоники при уровне нагрузки l , кВт; H – номер последней из учитываемых ВГ; B – количество ветвей; K_b^{np} – ежегодные затраты на проводники, \$/км; L_b – длина проводника ветви b , км; $K^{бк}$ – ежегодные затраты на БК, \$; $k_f^{бк}$ и $k_s^{бк}$ – ежегодные затраты на БК фиксированной мощности и со ступенчатым регулированием, соответственно, \$; u_{fjl} и u_{sjl} – количество типовых размеров БК фиксированной мощности и со ступенчатым регулированием, устанавливаемых в узле j при уровне нагрузки l , соответственно; S_c – количество узлов, в которых предполагается установка БК.

При каждом уровне нагрузки l в общем случае должны были выполняться следующие ограничения.

1. Токи в ветвях не должны были превышать максимально допустимых значений:

$$I_b \leq I_{b\max}, \quad (15)$$

где I_b – ток в ветви b , А; $I_{b\max}$ – максимально допустимый ток для проводника данного типа, А.

2. Напряжения в узлах должны были находиться в установленных пределах:

$$U_{\min} \leq |U_i| \leq U_{\max}; \quad (16)$$

$$|U_i| = \sqrt{\sum_{h=1}^H |U_{hi}|^2}, \quad (17)$$

где $|U_i|$ – среднеквадратическое значение напряжения в узле i , о.е.; U_{\min} и U_{\max} – соответственно минимально и максимально допустимое среднеквадратическое значение напряжения в узле i , о.е. (при моделировании были приняты значения $U_{\min} = 0,9$ о.е. и $U_{\max} = 1,1$ о.е.); U_{hi} – напряжение h -й гармоники в узле i , о.е.

3. Значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах или суммарных коэффициентов гармонических составляющих по напряжению (total harmonic distortion) THD_i не должны были превышать максимально допустимого значения $THD_{\max} = 5\%$:

$$THD_i \leq THD_{\max}; \quad (18)$$

$$THD_i = \frac{100}{|U_{1i}|} \sqrt{\sum_{h \neq 1}^H |U_{hi}|^2}, \quad (19)$$

где U_{1i} – напряжение основной частоты в узле i , о.е.

4. Суммарная генерация реактивной мощности в сеть не должна была превышать суммарной реактивной мощности нагрузки:

$$\sum_{j=1}^{S_c} Q_j^{\text{БК}} \leq \sum_{i=1}^m Q_i, \quad (20)$$

где $Q_j^{\text{БК}}$ – типоразмер БК, устанавливаемой в узле j , квар; m – количество узлов в РС; Q_i – реактивная нагрузка в узле i , квар.

5. В РС не должно было быть отключенных нагрузок.
6. Конфигурация РС должна была иметь радиальную структуру.

Целевые функции для разных вариантов оптимизации (а)-(д) с указанием использованных и неиспользованных при этом ограничений (1)-(6) представлены в табл. 2. В качестве примера на рис. 2 показаны результаты выбора оптимальных мест установки и мощности БК для варианта оптимизации (д). Типоразмеры и ежегодные затраты на БК, полученные при допущении о 10-летнем ожидаемом сроке их службы, приведены в табл. 3. Результаты выбора оптимальных сечений проводников для вариантов оптимизации (б), (г) и (д) приведены в табл. 4 и 5. Параметры кабельных линий (КЛ) и воздушных линий (ВЛ), а также ежегодные затраты на проводники, полученные при допущении о 10-летнем ожидаемом сроке их службы, приведены в [28]. Оптимальные конфигурации РС для вариантов оптимизации (в)-(д) представлены в табл. 6. Суммарная установленная мощность БК, минимальные и максимальные значения напряжений в узлах, максимальные значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения в узлах, суммарные потери мощности и ЭЭ для разных вариантов оптимизации (а)-(д) приведены в табл. 7. В режиме максимальных нагрузок напряжения в узлах до оптимизации и для варианта оптимизации (д) показаны на рис. 3, значения THD_i для вариантов оптимизации (г) и (д) – на рис. 4.

Таблиця 2

Целевые функции и ограничения для разных вариантов оптимизации

Вариант оптимизации	Целевая функция	Ограничения					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Вариант (а)	$F = K^{\text{II}} \Delta P_1 + K^{\text{III}} \sum_{l=1}^L \Delta P_l T_l + K^{\text{бк}}$	Нет	Да	Нет	Да	Нет	Нет
Вариант (б)	$F = K^{\text{II}} \Delta P_1 + K^{\text{III}} \sum_{l=1}^L \Delta P_l T_l + \sum_{b=1}^B K_b^{\text{II}} L_b$	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Вариант (в)	$F = K^{\text{II}} \Delta P_1 + K^{\text{III}} \sum_{l=1}^L \Delta P_l T_l$	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Вариант (г)	$F = K^{\text{II}} \Delta P_1 + K^{\text{III}} \sum_{l=1}^L \Delta P_l T_l + \sum_{b=1}^B K_b^{\text{II}} L_b + K^{\text{бк}}$	Да	Да	Нет	Да	Да	Да
Вариант (д)	$F = K^{\text{II}} \Delta P_1 + K^{\text{III}} \sum_{l=1}^L \Delta P_l T_l + \sum_{b=1}^B K_b^{\text{II}} L_b + K^{\text{бк}}$	Да	Да	Да	Да	Да	Да

Да – такое ограничение использовалось для этого варианта оптимизации.
 Нет – такое ограничение не использовалось для этого варианта оптимизации.

Таблиця 3

Типоразмеры и ежегодные затраты на БК

Типоразмер, квар	50	100	150	200	250	300	350	400
Затраты, \$/квар	2,25	1,78	1,93	1,44	1,6	1,33	1,46	1,24
Типоразмер, квар	450	500	550	600	650	700	750	800
Затраты, \$/квар	1,35	1,19	1,28	1,13	1,22	1,22	1,29	1,09



Рис. 2. Результаты выбора оптимальных мест установки и мощности БК для варианта оптимизации (д)

Таблиця 4

Результати вибору оптимальних сечений КЛ

Тип КЛ	До оптимізації	Варіант (б)	Варіант (г)	Варіант (д)
1	36, 52, 54, 57, 64, 65, 68, 71, 72, 80, 113, 133, 152, 173, 204, 235, 239, 241	41, 47, 50, 51, 65, 80, 84, 121, 122, 123, 131, 145, 161, 171, 180, 182, 183, 189, 195, 197, 235, 236, 237, 243, 253, 261, 263, 267	41, 47, 50, 51, 63, 65, 80, 84, 121, 122, 123, 130, 131, 138, 145, 156, 171, 180, 182, 183, 189, 195, 197, 199, 235, 236, 237, 243, 253, 261, 263	47, 50, 51, 63, 65, 80, 84, 91, 108, 121, 122, 123, 131, 135, 136, 138, 145, 156, 171, 173, 180, 183, 184, 195, 197, 199, 235, 237, 240, 243, 244, 246, 248, 251, 253, 261, 263
2	28, 30, 33, 58, 66, 67, 69, 73, 74, 75, 76, 117, 118, 123, 134, 135, 136, 153, 154, 156, 157, 159, 160, 164, 167, 172, 182, 184, 188, 189, 192, 193, 194, 234, 236, 237, 240, 245, 246, 250, 251, 254, 255, 256, 257, 259, 260, 261, 266, 267	9, 12, 17, 26, 43, 58, 59, 68, 69, 78, 82, 91, 108, 130, 135, 137, 152, 165, 184, 190, 194, 240, 246, 248, 251	9, 12, 17, 26, 55, 58, 59, 68, 69, 78, 79, 82, 91, 108, 135, 136, 152, 158, 165, 168, 184, 190, 240, 246, 248, 251	9, 12, 17, 26, 32, 33, 55, 58, 59, 68, 69, 78, 79, 82, 130, 134, 137, 152, 158, 165, 168, 172, 181, 182, 189, 190, 236, 239, 241, 245, 250
3	2, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 18, 20, 22, 26, 32, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 78, 84, 91, 121, 122, 129, 130, 131, 137, 145, 147, 148, 165, 166, 171, 179, 180, 181, 183, 190, 201, 202, 243, 244, 248, 249, 264, 272	2, 14, 15, 24, 25, 32, 33, 45, 46, 57, 61, 64, 72, 118, 129, 133, 134, 136, 181, 202, 204, 234, 239, 241, 250, 260, 265, 266	2, 14, 15, 22, 24, 25, 32, 33, 45, 46, 57, 61, 64, 72, 118, 129, 133, 134, 181, 194, 202, 204, 234, 239, 241, 250, 260	2, 14, 15, 22, 24, 25, 41, 45, 46, 57, 61, 64, 72, 116, 117, 118, 133, 193, 194, 202, 204, 234, 249, 260
4	4, 5, 19, 25, 61, 82, 161, 271	1, 11, 20, 22, 36, 49, 67, 71, 75, 76, 117, 147, 148, 159, 160, 164, 166, 167, 173, 188, 192, 193, 201, 245, 257, 259, 264, 272	1, 11, 35, 36, 49, 67, 71, 75, 76, 77, 117, 137, 147, 148, 154, 159, 164, 166, 167, 172, 173, 179, 188, 192, 193, 201, 245, 257, 259, 272	1, 11, 36, 49, 67, 71, 75, 76, 77, 129, 147, 148, 154, 159, 164, 166, 167, 187, 188, 201, 257, 259, 272
5	10, 17, 24, 41, 48, 62, 70, 108, 139, 186, 232, 233, 238, 247, 252, 253, 262, 263, 265	10, 18, 19, 30, 44, 54, 66, 74, 113, 139, 172, 256, 244, 249, 262, 271	10, 30, 43, 54, 66, 74, 113, 116, 124, 139, 160, 187, 200, 244, 249, 256, 271	10, 30, 35, 43, 54, 66, 74, 113, 124, 139, 160, 200, 238, 256, 271
6	1, 3, 16, 23, 50, 51, 59, 195, 197	3, 4, 5, 6, 8, 16, 23, 28, 48, 52, 62, 70, 73, 153, 154, 156, 157, 179, 186, 232, 233, 238, 247, 252, 254, 255	3, 4, 5, 6, 8, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 28, 42, 44, 48, 52, 62, 70, 73, 85, 146, 153, 157, 161, 162, 186, 232, 233, 238, 247, 252, 254, 255, 262, 264, 265, 266, 267	3, 4, 5, 6, 8, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 28, 42, 44, 48, 52, 62, 70, 73, 85, 146, 153, 157, 161, 162, 179, 186, 192, 232, 233, 247, 252, 254, 255, 262, 264, 265, 266, 267

Таблица 5

Результаты выбора оптимальных сечений ВЛ

Тип ВЛ	До оптимизации	Вариант (б)	Вариант (г)	Вариант (д)
1	29, 34, 38, 39, 120,127, 128, 132, 174,175, 176, 177, 178, 229, 230, 231, 258, 273	94, 96, 140, 142, 149, 150, 177, 210, 226	94, 96, 127, 140, 142, 149, 150, 177, 210, 226	88, 93, 94, 96, 97, 100, 101, 103, 110, 115, 120, 140, 142, 149, 150, 176, 177, 178, 206, 214, 224, 226, 227, 231, 242
2	13, 37, 86, 88, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 115, 119, 140, 142, 144, 149, 150, 206, 219, 220, 222, 226, 228	56, 83, 88, 93, 97, 100, 101, 103, 110, 115, 120, 169, 174, 178, 206, 209, 212, 214, 216, 220, 222, 224, 227, 231, 242, 258	56, 83, 88, 93, 97, 100, 101, 103, 110, 115, 120, 169, 174, 178, 206, 209, 212, 214, 216, 220, 222, 224, 227, 231, 242,258	56, 83, 86, 92, 109, 119, 127, 128, 169, 174, 175, 209, 210, 212, 216, 222, 230, 258
3	40, 56, 87, 89, 97, 111, 112, 114, 125, 141, 143, 169, 170, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 216, 221,242	39, 40, 92, 109, 119, 143, 144, 273	39, 40, 92, 109, 119, 143, 144, 273	39, 40, 132, 143, 144, 219, 220, 229, 273
4	27, 81, 83,185, 207, 211, 215, 217, 218, 224	37, 38, 86, 106, 107, 141, 175, 176, 208, 218, 219, 229, 230	37, 38, 86, 106, 107, 126, 141, 175, 176, 208, 218, 219, 229, 230	37, 38, 126, 141, 208, 218, 228
5	227	104, 105, 128, 228	104, 105, 128,228	—
6	223, 225	13, 27, 29, 34, 81, 87, 89, 90, 95, 98, 102, 111, 112, 114, 125, 126, 127, 132, 170, 185, 191, 207, 211, 213, 215, 217, 221, 223, 225	13, 27, 29, 34, 81, 87, 89, 90, 95, 98, 102, 111, 112, 114, 125, 132, 170, 185, 191, 207, 211, 213, 215, 217, 221, 223, 225	13, 27, 29, 34, 81, 87, 89, 90, 95, 98, 102, 104, 105, 106, 107, 111, 112, 114, 125, 170, 185, 191, 207, 211, 213, 215, 217, 221, 223, 225

Таблица 6

Результаты оптимизации конфигурации РС

Варианты	Разомкнутые ветви
До оптимизации	274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284
Вариант (в)	111, 275, 276, 170, 278, 181, 178, 281, 132, 129, 157
Вариант (г)	111, 275, 276, 170,181, 179, 178, 245, 132, 129, 157
Вариант (д)	111, 275, 276, 170,181, 179, 178, 245, 132, 129, 157

Таблиця 7

Результаты моделирования для разных вариантов оптимизации

Показатель	До оптимизации	Вариант (а)	Вариант (б)	Вариант (в)	Вариант (г)	Вариант (д)
Суммарная установленная мощность БК, квар	0	13000	0	0	13400	10700
Минимальные значения напряжений в узлах, о.е.	0,79	0,9	0,893	0,878	0,977	0,96
Максимальные значения напряжений в узлах, о.е.	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Максимальные значения THD_i , %	3,9	9	3,9	3,9	8,5	4,99
Суммарные потери мощности, кВт	4637,0	3804,6	2691,2	3902,2	2095,9	2211,0
Суммарные потери ЭЭ за год, кВт·ч	15853464	13016471	9200991,4	13341410	7166639	7600738
Суммарные потери мощности, %	7,4	6	4,3	6,2	3,3	3,5
Суммарные потери ЭЭ за год, %	5	4	2,9	4,2	2,24	2,38

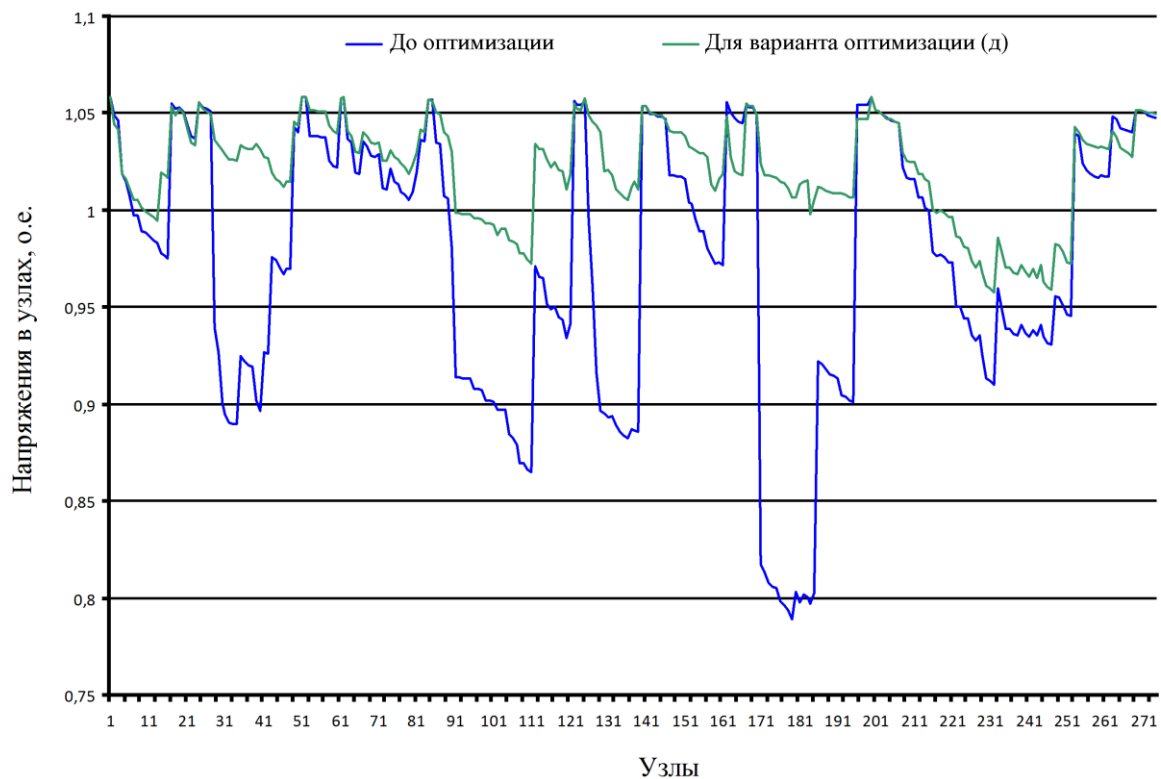


Рис. 3. Напряжения в узлах до оптимизации и после оптимизации (вариант (д)) в режиме максимальных нагрузок

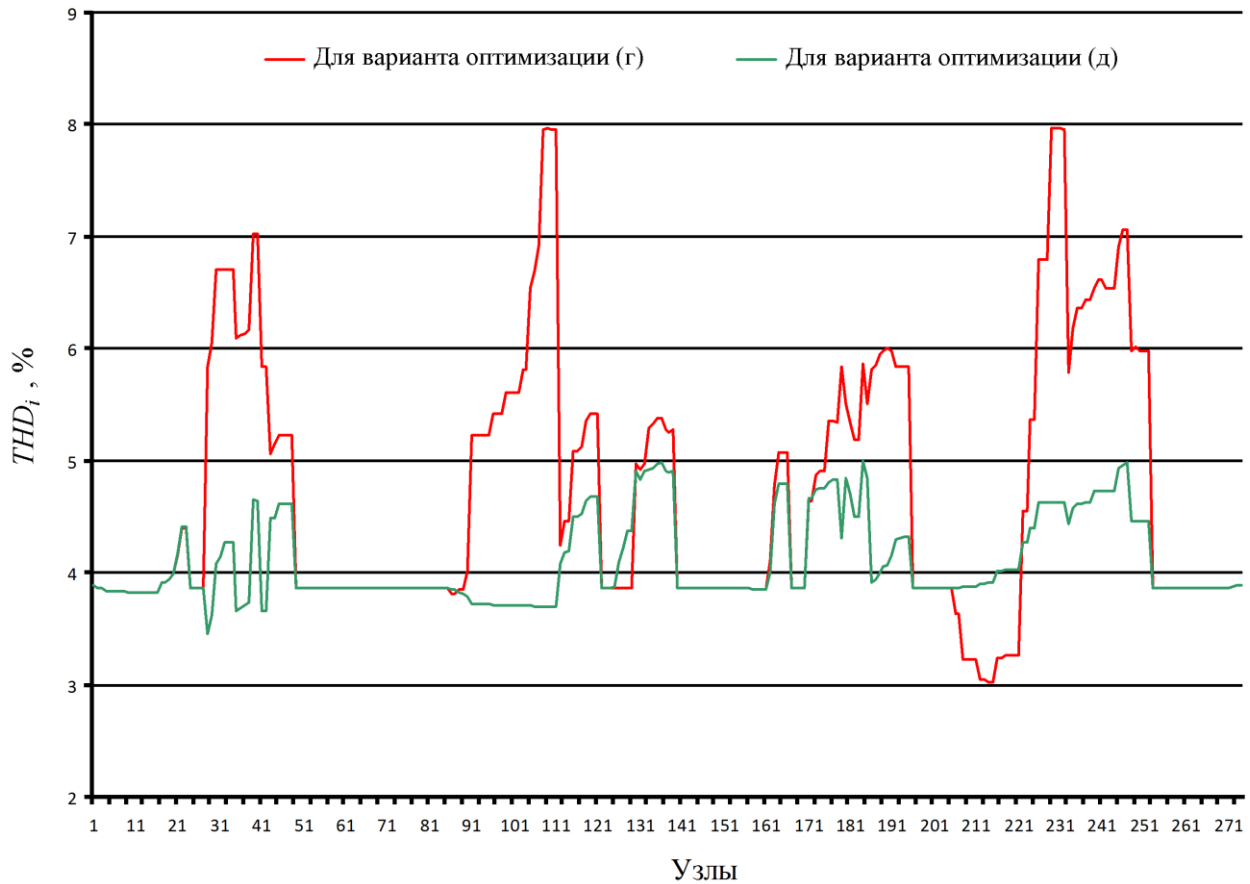


Рис. 4. Значения THD_i для вариантов оптимизации (г) и (д) в режиме максимальных нагрузок

Для оптимизации мест установки и мощности БК использовался двухэтапный гибридный алгоритм, объединяющий экспертную систему на основе нечёткой логики (fuzzy expert system (FES)) и СМРЧ: на первом этапе использовалась FES, чтобы сократить пространство решений и выбрать оптимальные места установки БК, а на втором – СМРЧ, чтобы определить оптимальные сочетания типоразмеров БК со ступенчатым регулированием (нерегулируемых и регулируемых) и сократить количество мест их установки. С помощью FES из 274 узлов нагрузки к установке БК были выбраны только 60, а использование СМРЧ позволило сократить их количество до 33, 21 и 31 для вариантов оптимизации (а), (г) и (д), соответственно, подтвердив тем самым высокую эффективность предлагаемого двухэтапного гибридного алгоритма.

До оптимизации величины напряжений на всех трёх подстанциях составляли около 6,35 кВ (1,06 о.е.), однако в режиме максимальных нагрузок минимальное значение напряжения получилось равным 0,79 о.е. (табл. 7, рис. 3), что объясняется наличием относительно длинной (около 4 км) ВЛ сечением 70 мм², соединяющей подстанцию «Город-4» с потребителями, подключенными в узлах нагрузки 171-185. После оптимизации (особенно после совместной оптимизации мест установки и мощности БК, конфигурации и сечений проводников) качество напряжения в узлах нагрузки значительно улучшилось, а использование ограничений (3) для варианта оптимизации (д) позволило получить значения $THD_i \leq 5\%$ (табл. 7, рис. 4).

Экономические показатели схемы после оптимизации приведены в табл. 8.

Таблица 8

Экономические показатели схемы для разных вариантов оптимизации

Показатель	Вариант (а)	Вариант (б)	Вариант (в)	Вариант (г)	Вариант (д)
Затраты на БК, \$/год	17213,3	0	0	17521,5	13421,25
Затраты на проводники, \$/год	0	213736,3	0	210827,0	206431,64
Экономия от снижения потерь мощности, \$/год	139842,13	326890,11	123434,72	426899,51	407559,23
Экономия от снижения потерь ЭЭ, \$/год	99294,75	232836,54	87921,90	304038,88	288845,42
Суммарная экономия, \$/год	239136,88	559726,65	211356,62	730938,40	696404,65
Срок окупаемости, лет	0,72	3,82	0,00	3,12	3,16
Остаточный период после момента окупаемости проекта, лет	9,28	6,18	10,00	6,88	6,84
Суммарная экономия за остаточный период, \$	2219236,31	3459903,5	2113566,2	5025898,7	4765517,61

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Совместная оптимизация мест установки и мощности БК, конфигурации и сечений проводников схемы с использованием ограниченный (3) позволяет снизить потери активной мощности с 7,4 % до 3,5 %, а потери ЭЭ – с 5 % до 2,38 % (примерно в 2 раза), что в денежном выражении соответствует суммарной годовой экономии примерно в 700000 \$, а суммарной экономии за остаточный период – в 4,8 млн. \$.
2. Применение реконфигурации как метода снижения потерь, не требующего инвестиционных расходов, приводит приблизительно к такому же экономическому эффекту, что и применение оптимизации мест установки и мощности БК, так как в обоих случаях наблюдается примерно одинаковое снижение потерь активной мощности и ЭЭ (с 7,4 % до около 6 % и с 5 % до около 4 %, соответственно).
3. По сравнению с оптимизацией мест установки и мощности БК, экономический эффект от оптимизации

сечений проводников примерно в 1,5 раза выше (даже без учёта стоимости существующих проводников до оптимизации и несмотря на то, что затраты на проводники примерно в 12 раз выше затрат на БК).

Библиографический список

1. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчётов [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с. – ISBN 978-5-93196-958-9.
2. Rao, S. S. Engineering optimization: theory and practice [Text] / S. S. Rao. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 830 p. – ISBN 978-0-470-18352-6.
3. Kennedy, J. Particle swarm optimization [Text] / J. Kennedy, R. C. Eberhart // Proc. IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'95). – 27 November–1 December 1995. – Vol. 4. – Perth (Australia). – P. 1942 – 1948.
4. Wu, W.-C. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration [Text] / W.-C. Wu, M.-S. Tsai // IEEE

- Transactions on Power Systems. – 2011. – Vol. 26. – No. 3. – P. 1591 – 1599.
5. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment [Text] / H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, Y. Nakanishi // IEEE Transactions on Power Systems. – 2000. – Vol. 15. – No. 4. – P. 1232 – 1239.
 6. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems [Text] / Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, R. G. Harley // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2008. – Vol. 12. – No. 2. – P. 171 – 195.
 7. Shi, Y. A modified particle swarm optimizer [Text] / Y. Shi, R. C. Eberhart // Proc. 2nd IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 98), 5th IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC 98). – 4-9 May 1998. – Anchorage, Alaska (USA). – P. 69 – 73.
 8. Shi, Y. Empirical study of particle swarm optimization [Text] / Y. Shi, R. C. Eberhart // Proc. 1st IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 99). – 6-9 July 1999. – Vol. 3. – Washington, District of Columbia (USA). – P. 1945 – 1950.
 - 9. Clerc, M. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [Text] / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – No. 1. – P. 58 – 73.
 - 10. Lee, K. Y. Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems [Text] / K. Y. Lee, M. A. El-Sharkawi. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 616 p. – ISBN 978-0-471-45711-4.
 11. Angeline, P. J. Using selection to improve particle swarm optimization [Text] / P. J. Angeline // Proc. 2nd IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 98), 5th IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC 98). – 4-9 May 1998. – Anchorage, Alaska (USA). – P. 84 – 89.
 12. Miranda, V. EPSO – best-of-two-worlds meta-heuristic applied to power system problems [Text] / V. Miranda, N. Fonseca // Proc. 4th IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 02). – 12-17 May 2002. – Vol. 2. – Honolulu, Hawaii (USA). – P. 1080 – 1085.
 13. Miranda, V. New evolutionary particle swarm algorithm (EPSO) applied to voltage/var control [Text] / V. Miranda, N. Fonseca // Proc. 14th Power Systems Computation Conference (PSCC'02). – 24-28 June 2002. – Session 21. – Paper 5. – Seville (Spain), 2002. – P. 1 – 6.
 14. Miranda, V. EPSO – evolutionary particle swarm optimization, a new algorithm with applications in power systems [Text] / V. Miranda, N. Fonseca // Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific. – 6-10 October 2002. – Vol. 2. – Yokohama (Japan). – P. 745 – 750.
 15. Damodar Reddy, M. Capacitor placement using fuzzy and particle swarm optimization method for maximum annual savings [Text] / M. Damodar Reddy, V. C. Veera Reddy // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2008. – Vol. 3. – No. 3. – P. 25 – 30.
 16. Swarnkar, A. Reconfiguration of radial distribution systems with fuzzy multi-objective approach using adaptive particle swarm optimization [Text] / A. Swarnkar, N. Gupta, K. R. Niazi // Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 25-29 July 2010. – Minneapolis, Minnesota (USA). – P. 1 – 8.
 17. Kennedy, J. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [Text] / J. Kennedy, R. C. Eberhart // Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'97). – 12-15 October 1997. – Vol. 5. – Orlando, Florida (USA). – P. 4104 – 4108.
 18. Parsopoulos, K. E. Recent approaches to global optimization problems through par-

- article swarm optimization [Text] / K. E. Parsopoulos, M. N. Vrahatis // *Natural Computing*. – 2002. – Vol. 1. – No. 2-3. – P. 235 – 306.
19. Laskari, E. C. Particle swarm optimization for integer programming [Text] / E. C. Laskari, K. E. Parsopoulos, M. N. Vrahatis // *Proc. 4th IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 02)*. – 12-17 May 2002. – Vol. 2. – Honolulu, Hawaii (USA). – P. 1582 – 1587.
20. Khalil, T. M. Selective particle swarm optimization [Text] / T. M. Khalil, A. V. Gorpnich // *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering (IJMSE)*. – 2012. – Vol. 3. – No. 4. – P. 1 – 4.
21. Baghzouz, Y. Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages [Text] // Y. Baghzouz, S. Ertem // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1990. – Vol. 5. – No. 2. – P. 650 – 657.
22. Baghzouz, Y. Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders [Text] / Y. Baghzouz // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1991. – Vol. 6. – No. 1. – P. 245 – 251.
23. Zhu, J. Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm [Text] / J. Z. Zhu // *Electric Power Systems Research*. – 2002. – Vol. 62. – No. 1. – P. 37 – 42.
24. Savier, J. S. Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems [Text] / J. S. Savier, D. Das // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2007. – Vol. 22. – No. 4. – P. 2473 – 2480.
25. Chang, C.-F. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm [Text] / C.-F. Chang // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2008. – Vol. 23. – No. 4. – P. 1747 – 1755.
26. Vahid, M. Maximum loss reduction applying combination of optimal conductor selection and capacitor placement in distribution systems with nonlinear loads [Text] / M. Vahid, A. A. Hossein, M. Kazem // *Proc. 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008)*. – 1-4 September 2008. – Padova (Italy). – P. 1 – 5.
27. Khalil Selim, T. M. Economical optimization of capacitor placement for large-scale practical distorted distribution network [Text] / T. M. Khalil Selim, A. V. Gorpnich // *Electrical Power Quality and Utilization Journal*. – 2013. – Vol. 16. – No. 2. – P. 21 – 29.
28. Халил, Т. М. Оптимизация сечений проводников в реальной разветвлённой распределительной сети с целью снижения потерь электроэнергии [Текст] / Т. М. Халил, А. В. Горпинич // *Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету*. – 2013. – № 2 (15). – С. 254 – 260.

Ключові слова: реальна розгалужена розподільна мережа з великою кількістю вузлів, багатокритеріальна частково цілочислова комбінаторна нелінійна оптимізація, селективний метод рою частинок, зниження втрат потужності та електроенергії.

Ключевые слова: реальная разветвлённая распределительная сеть с большим количеством узлов, многокритериальная частично целочисленная комбинаторная нелінійная оптимізація, селективний метод рою частиц, снижение потерь мощности и электроенергии.

Keywords: real large-scale distribution system, multi-objective mixed-integer combinatorial nonlinear optimization, selective particle swarm optimization, power and energy losses reduction.

Рецензенти:
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк,
д.т.н., проф. А. М. Афанасов.

Поступила в редколлегию 11.09.2015.
Принята к печати 22.09.2015.