

## УДК 621.316.11

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

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

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ИМПЕРИАЛИСТИЧЕСКОЙ КОНКУРЕНЦИИ

Алгоритм империалистической конкуренции (АИК) – это метод оптимизации, который можно считать разновидностью методов эволюционного моделирования (ЭМ). В отличие от традиционно применяемых методов ЭМ, он основан на социальной эволюции человека в обществе, а не на биологической эволюции видов в природе. АИК имитирует социально-политический процесс империализма, в основе которого лежит поглощение «сильными» странами (империалистами) более «слабых» (колоний). Инициализация алгоритма происходит путём генерации популяции индивидов, которая образует «страну». Популяция индивидов представляет собой совокупность переменных состояния, которая может рассматриваться как потенциальное решение в пространстве поиска. Фактически «страна» представляет собой аналогию «хромосом», используемых в генетических алгоритмах (ГА), а индивиды – аналогию «частиц», используемых в методе роя частиц (МРЧ), т.е. это набор переменных, подлежащих оптимизации. Применительно к АИК каждая из этих переменных может быть интерпретирована как её некая социально-политическая характеристика (СПХ) – например, как культура, язык, состояние экономики, религия и т.д., поэтому алгоритм пытается найти «лучшую» страну как страну с наилучшей комбинацией СПХ. С точки зрения теории оптимизации это означает, что алгоритм пытается найти оптимальное решение проблемы (минимум целевой функции), т.е. решение, при котором обеспечивается минимум затрат. Функция затрат определяет «силу»

или «мощь» каждой страны, причём эта «мощь» обратно пропорциональна «стоимости» страны, так как «лучшая» страна должна давать решение с минимумом функции затрат.

После процедуры инициализации осуществляется градация «стран» на «империалистов» и «колонии», исходя из их «мощи». Некоторые из «лучших» стран (страны с минимальными значениями функции затрат) причисляются к «империалистам», которые берут власть над остальными странами («колониями»), формируя вместе с ними «империю». Все колонии распределяются между империалистами пропорционально «мощи» этих империалистов. Суммарная «мощь империи» складывается из «мощи» империалистов и «мощи» колоний. «Мощь» империи, обратно пропорциональную её «стоимости», можно рассматривать как аналог фитнес-функции в ГА (целевой функции, с помощью которой определяется приемлемость решения), так как она устанавливает связь между решаемой проблемой и алгоритмом оптимизации.

После формирования первоначальных империй колонии в каждой из них начинают стремиться к интеграции с империалистами – происходит так называемый «этнокультурный сдвиг» в их сторону, представляющий собой простую модель политики ассимиляции, которая проводилась некоторыми империалистическими государствами в эпоху неокolonизма. В АИК «ассимиляция» – процесс, который заставляет колонии в каждой империи интегрироваться в пространство СПХ империалистов (про-

странство поиска с точки зрения теории оптимизации), – например, происходит заимствование ценностей, манер поведения, традиций и т.д. Другими операторами АИК являются «революция» (аналог «мутации» в ГА) – внезапное изменение в СПХ страны, в результате которой, например, колония может занять место империалиста, и собственно «конкуренция» между империями за обладание колониями, которая и приводит к оптимальному решению.

Империализм – это политика, основанная на экспансии силы, образа и стиля жизни, идеологии и т.д. за пределы собственного государства. По отношению к современным реалиям может использоваться термин «неоколониализм». Наиболее сильно империализм проявился в XVIII–XX вв. во время усиления колониальной экспансии со стороны европейских государств и США в соответствии с идеей преобладания культуры Запада над культурой Востока. Империализм привёл к развитию империалистическими государствами своих колоний. Например, в середине XVIII в. два конкурирующих империалиста, Франция и Великобритания, боролись за обладание Индией. Великобритания вышла победителем в этой борьбе и после установления порядка в течение последующих веков начала строить в Индии англоязычные школы, автомобильные и железные дороги, телеграфные линии и т.д.

В качестве другого примера можно привести Индокитай, который долгое время был колонией Франции, заинтересованной в использовании его природных ресурсов, в стремлении обратить неверующих в свою веру и т.п. В соответствии с проводимой политикой «ассимиляции» Франция пыталась создать «новую» Францию на территории Индокитая путём распространения своих

обычаев, культуры, строительства франкоязычных школ и др. Несмотря на то, что в приведенных выше примерах империализма полного контроля над своими колониями империалисты не получили и в конечном итоге колонии обрели политическую автономию, тем не менее, такая политика империалистических государств по отношению к своим колониям привела к бурному социально-политическому развитию последних. Рассмотренные исторические процессы и легли в основу математического описания АИК [1–10].

Цель работы – представить модифицированную версию АИК (МАИК) и результаты её верификации применительно к решению задачи реконфигурации (оптимизации конфигурации) распределительной сети (РС) с целью снижения потерь электроэнергии (ЭЭ). Верификация осуществлялась с помощью двух тестовых схем IEEE (33-узловой и 69-узловой), а в качестве других методов оптимизации использовались нечёткая логика, селективный МРЧ (СМРЧ), ГА и муравьиные алгоритмы (МА). В результате верификации было установлено, что применение МАИК позволяет получить аналогичные результаты.

Рассмотрим математическое описание операторов МАИК. Как уже отмечалось выше, инициализация МАИК происходит путём генерации совокупности переменных состояния, которая образует «страну». Пусть пространство решений (поиска) является  $S$ -мерным, тогда «страна» может быть представлена в виде:

$$\text{страна}_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{is}, \dots, p_{iS}], \quad (1)$$

где  $p_{is}$  – переменные состояния, подлежащие оптимизации.

На рис. 1 показана интерпретация страны с помощью некоторых СПХ.

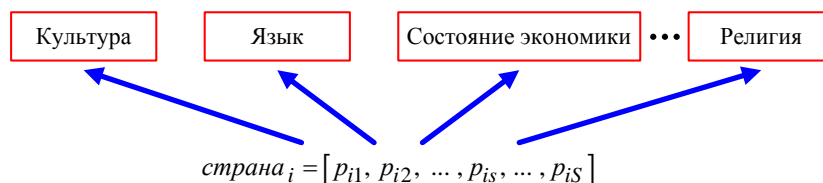


Рис. 1. Интерпретация страны с помощью некоторых СПХ

«Стоимость» страны определяется функцией затрат при известных переменных состояниях  $(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{is}, \dots, p_{iS})$ , поэтому

$$\begin{aligned} \text{затраты}_i &= f(\text{страна}_i) = \\ &= f[p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{is}, \dots, p_{iS}]. \end{aligned} \quad (2)$$

Чтобы осуществить градацию «стран» на «империалистов» и «колонии», исходя из их «стоимости», обозначим через  $N_{\text{стр}}$  – количество стран, которые генерируются на этапе инициализации, через  $N_{\text{имп}}$  – количество империалистов, а через  $N_{\text{кол}}$  – количество колоний:

$$N_{\text{стр}} = N_{\text{имп}} + N_{\text{кол}}, \quad (3)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{стр}}$ ;  $j = 1, 2, \dots, N_{\text{имп}}$ ;  $k = 1, 2, \dots, N_{\text{кол}}$ .

Обозначим «стоимость»  $j$ -го империалиста через  $C_j$ , тогда его «мощь»

$$M_j = \frac{1}{C_j}. \quad (4)$$

Так как все колонии распределяются между империалистами пропорционально «мощи» этих империалистов, то вероятность обладания  $j$ -м империалистом коли-

чеством колоний  $N_{\text{кол}}^{\text{имп}}$  можно оценить с помощью выражения:

$$p_j = \frac{M_j}{\sum_{j=1}^{N_{\text{имп}}} M_j}. \quad (5)$$

Количество колоний  $N_{\text{кол}}^{\text{имп}}$ , которые достанутся  $j$ -му империалисту:

$$N_{\text{кол}}^{\text{имп}} = p_j N_{\text{кол}}, \quad (6)$$

где  $N_{\text{кол}}^{\text{имп}}$  округляется до ближайшего целого значения ( $r = 1, 2, \dots, N_{\text{кол}}^{\text{имп}}$ ).

Таким образом, полученное с помощью выражения (6) количество колоний вместе с соответствующим  $j$ -м империалистом формирует первоначальную империю  $t$ , причём  $t = 1, 2, \dots, N_{\text{имп}}$ , где  $N_{\text{имп}}$  – количество первоначальных империй. Процедура формирования первоначальных империй показана на рис. 2.

Как видно из рис. 2, чем бóльшим количеством колоний обладает империалист, тем больше размер звезды соответствующего цвета. Кроме того, «сильные» империи имеют больше колоний, а «слабые» – меньше. Например, «Империалист 1» сформировал самую «мощную» империю с наибольшим количеством колоний.

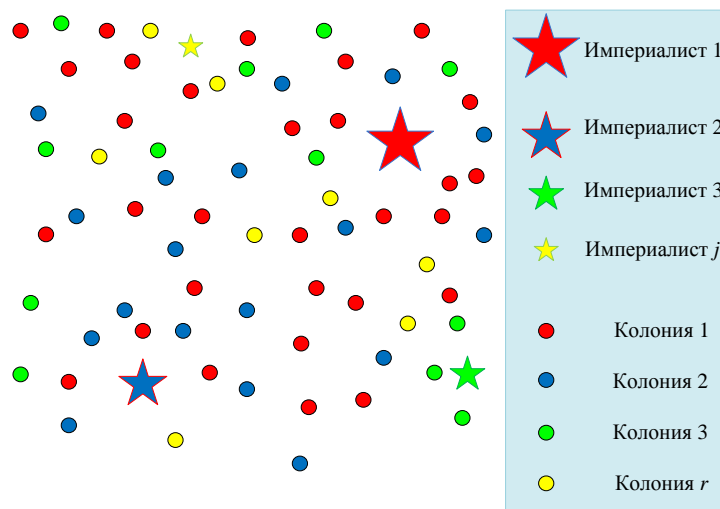


Рис. 2. Процедура формирования первоначальных империй

Процесс «ассимиляции» показан на рис. 3.

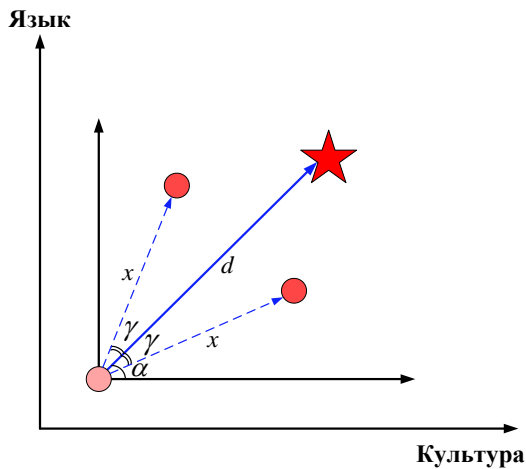


Рис. 3. Движение колонии к империалисту с учётом случайного отклонения от прямого направления

Рис. 3 наглядно иллюстрирует, как в двумерном пространстве состояний «язык-культура» происходит интеграция колонии в пространство «язык-культура» империалиста. Этот процесс моделируется как движение колонии в сторону империалиста (на рис. 3 показано перемещение колонии на  $x$  позиций, причём новая позиция колонии изображена более насыщенным цветом). Направление движения отображается как вектор, направленный от колонии к империалисту. На рис. 3 расстояние между колонией и империалистом обозначено как  $d$ ; угол, характеризующий прямое направление, – как  $\alpha$ ; угол, характеризующий отклонение от прямого направления как в одну, так и в другую стороны, – как  $\gamma$ . Расстояние  $x$  можно рассматривать как случайную величину, которая подчиняется равномерному закону распределения (рис. 4).

На рис. 4 в общем случае число  $\beta > 1$ , но для большинства практических приложений рекомендуется принимать  $\beta = 2$ .

Угол  $\varphi = \alpha \pm \gamma$ , характеризующий направление движения колонии к империалисту, тоже можно рассматривать как равномерно распределённую случайную вели-

чину с учётом того, что угол  $\gamma$  изменяется в диапазоне от  $-\pi/4$  до  $+\pi/4$  (рис. 5).

«Революция» (аналог «мутации» в ГА) характеризует внезапное изменение в СПХ страны и происходит за относительно короткий период времени по сравнению с «ассимиляцией». «Революция» позволяет МАИК более тщательно исследовать пространство поиска и избежать попадания в локальные оптимумы (преждевременной сходимости). Как уже отмечалось, в результате «революции» колония, например, может занять место империалиста. На рис. 6 показана «революция» в двумерном пространстве состояний «язык-культура».

Количество колоний в империи, в которых происходит «революция», можно оценить в процентах (или как соотношение к общему количеству колоний) с помощью показателя  $\lambda$ . На практике в большинстве случаев принимают  $\lambda = 0,1 \div 0,3$  ( $10 \div 30\%$ ).

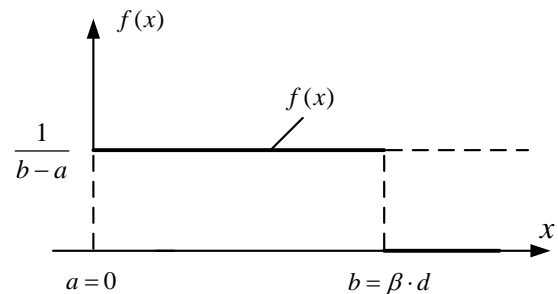


Рис. 4. Плотность распределения  $f(x)$  случайной величины  $x$ , равномерно распределённой на интервале  $a = 0 \leq x \leq b = \beta \cdot d$

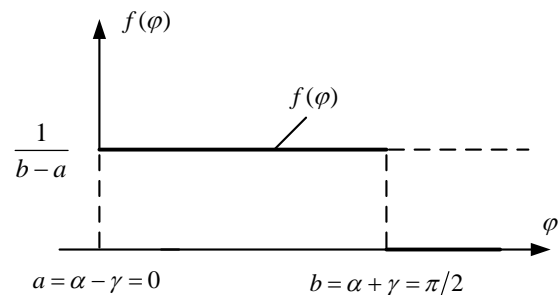


Рис. 5. Плотность распределения  $f(\varphi)$  случайной величины  $\varphi$ , равномерно распределённой на интервале  $a = \alpha - \gamma = 0 \leq \varphi \leq b = \alpha + \gamma = \pi/2$

В процессе движения колонии к империалисту она может достичь такой позиции, которая будет соответствовать даже меньшей «стоимости», чем у империалиста. В этом случае колония и империалист поменяются местами. На рис. 7 показан процесс изменения позиций империалиста и колонии. На рис. 7, а самая «лучшая» колония империи показана более насыщенным цветом. Эта колония имеет меньшую «стоимость», чем империалист. На рис. 7, б показано, как колония и империалист меняются местами.

В процессе движения колоний и империалистов в сторону нахождения глобального минимума некоторые империалисты могут проходить через те же самые позиции. Если расстояние между двумя империалистами становится меньше какого-то заданного порогового значения, они могут объединиться, сформировав тем самым новую империю, представляющую собой комбинацию двух исходных империй. Все колонии двух исходных империй становятся колониями одной новой империи, а один новый империалист займёт позицию одного из двух империалистов. Процесс объединения двух империй показан на рис. 8.

Суммарная «мощь империи» зависит, главным образом, от «мощи» империалиста. Тем не менее, «мощь» колоний империи тоже оказывает своё влияние, пусть и незначительное, на суммарную «мощь империи». Этот факт отображается в модели МАИК с помощью выражения для оценки суммарной «стоимости империи»:

$$C_i = C_j + \xi m \left[ \sum_{r=1}^{N_{\text{код}}^{\text{имп}}} C_r \right], \quad (7)$$

где  $\xi < 1$  – положительное число, обычно принимают  $\xi = 0,1$ ;  $m$  – математическое ожидание стоимости колоний империи, количество которых оценивается по выражению (6).

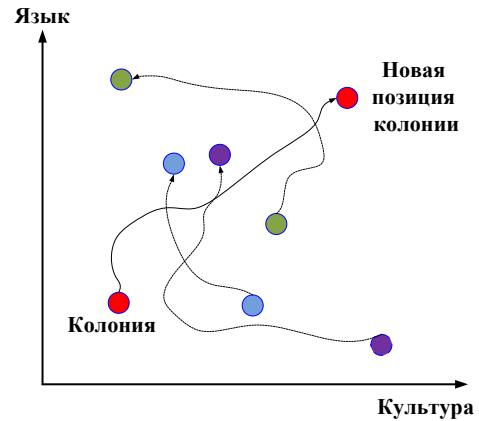


Рис. 6. Революция

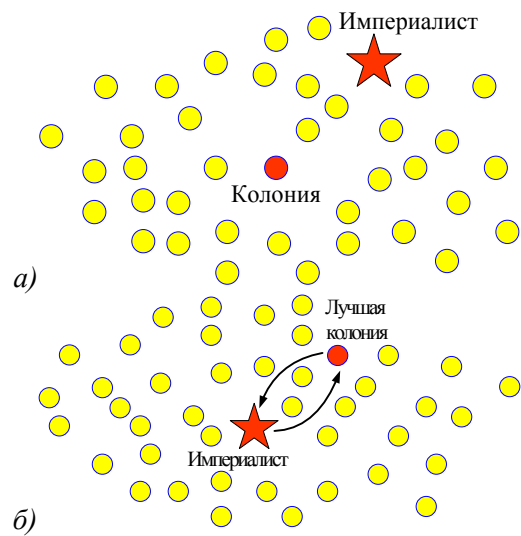


Рис. 7. Процесс изменения позиций империалиста и колонии: а) обмен позициями; б) империя после обмена позициями

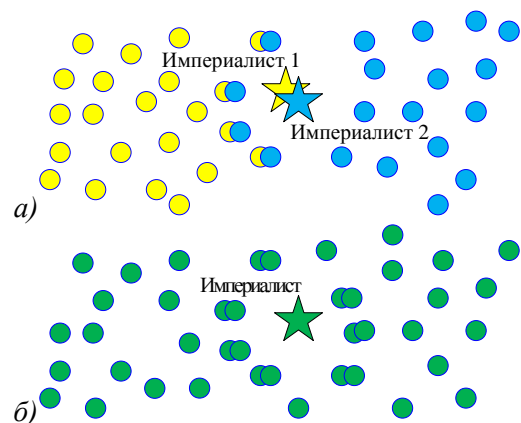


Рис. 8. Процесс объединения двух империй: а) империи до объединения; б) новая империя как результат объединения

Тогда суммарная «мощь империи»

$$M_t = \frac{1}{C_t}. \quad (8)$$

Все империи стремятся захватить как можно больше колоний других империй и установить над ними контроль. Такая «конкуренция» между империями постепенно приводит к снижению «мощи» «слабых» империй и к увеличению «мощи» «сильных». «Конкуренция» моделируется путем выбора некоторого количества «слабых» колоний  $N_{\text{сл кол}}$  в самой «слабой» империи в качестве потенциальных «кандидатов», переходящих под контроль остальных империй. На рис. 9 показана «конкуренция» между империями.

Так как все «слабые» колонии распределяются между империями пропорционально «мощи» этих империй, то вероятность обладания  $t$ -й империей количеством «слабых» колоний  $N_{\text{сл кол}}^{\text{ИМП}}$  самой «слабой» империи можно оценить с помощью выражения:

$$p_t = \frac{M_t}{\sum_{t=2} N_{\text{ИМП}}}. \quad (9)$$

Количество «слабых» колоний  $N_{\text{сл кол}}^{\text{ИМП}}$ , которые перейдут под контроль  $t$ -й империи:

$$N_{\text{сл кол}}^{\text{ИМП}} = p_t N_{\text{сл кол}}, \quad (10)$$

где  $N_{\text{сл кол}}^{\text{ИМП}}$  округляется до ближайшего целого значения ( $z = 1, 2, \dots, N_{\text{сл кол}}^{\text{ИМП}}$ ).

В процессе «конкуренции» между империями «слабые» империи будут «разваливаться» (испытывать коллапс), а «сильные» будут захватывать с каждым шагом алгоритма все больше колоний. Признаком полного коллапса империи является потеря всех своих колоний. Таким образом, после ряда итераций (моделирования на каком-то временном интервале (например, через несколько десятилетий)) останется только одна «сверхимперия», обладающая всеми колониями, в которой позиции империалистов и колоний совпадают.

Блок-схема МАИК приведена на рис. 10.

Представленная на рис. 10 блок-схема МАИК была разработана применительно к решению задачи реконфигурации РС с целью снижения потерь ЭЭ и реализована в среде MATLAB R2010a. Целевая функция (функция ежегодных затрат) определялась следующим образом:

$$F = K^n \Delta P, \quad (11)$$

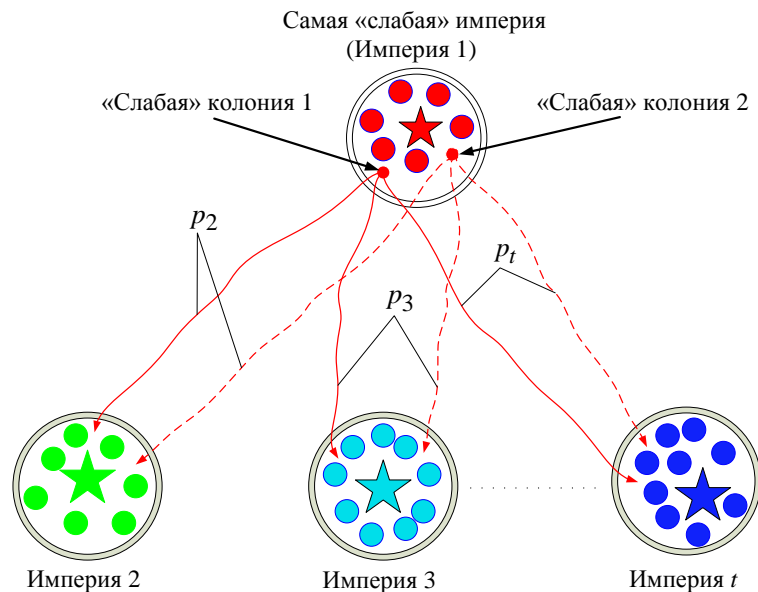


Рис. 9. «Конкуренция» между империями

где  $K^n$  – эквивалентная ежегодная стоимость потерь активной мощности, \$/кВт;  $\Delta P$  – суммарные потери активной мощности, кВт.

При этом учитывались такие ограничения.

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

$$I_b \leq I_{b\max}, \quad (12)$$

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

2. Напряжения в узлах должны находиться в установленных пределах:

$$U_{\min} \leq |U_i| \leq U_{\max}, \quad (13)$$

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.

3. РС должна иметь радиальную структуру.

4. В РС не должно быть отключенных нагрузок.

Чтобы убедиться в корректности разработанного алгоритма, был выполнен анализ эффективности его использования путём сравнения с другими методами искусственного интеллекта. Верификация осуществлялась с помощью двух тестовых схем IEEE (33-узловой и 69-узловой), а в качестве других методов оптимизации использовались нечёткая логика, СМРЧ, ГА и МА. В результате верификации было установлено, что применение МАИК позволяет получить аналогичные результаты (табл. 1).

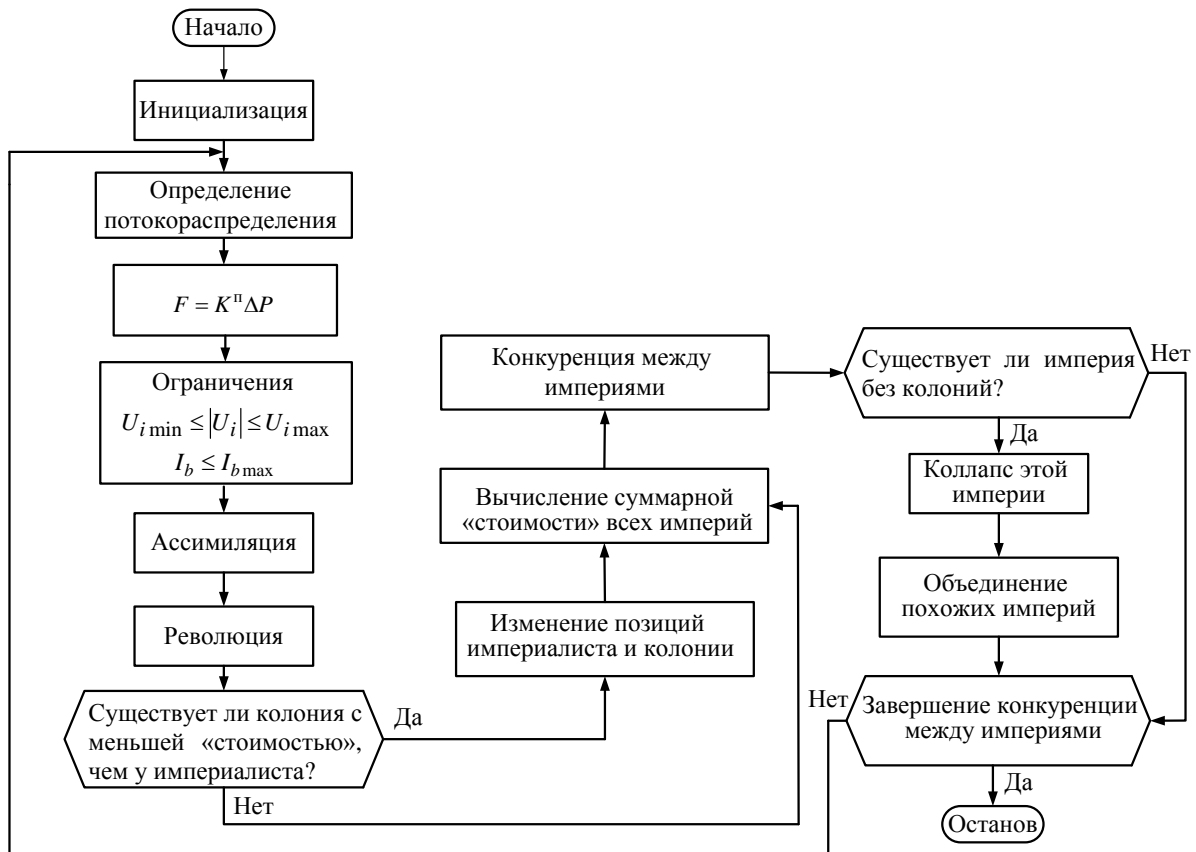


Рис. 10. Блок-схема МАИК

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана упрощённая модифицированная версия АИК – МАИК, в которой, в отличие от оригинального АИК [1], удалось отказаться от понятий «нормированная стоимость империалиста» и «нормированная стоимость империи», используя вместо этого для определения вероятностей обладания колониями непосредственно понятия «мощь империалиста» и «мощь империи», что позволило упростить программную реализацию АИК, повысить его быстродействие и эффективность.

2. С помощью двух тестовых схем IEEE (33-узловой и 69-узловой) была проведена верификация МАИК на примере решения задачи оптимизации конфигурации РС с целью снижения потерь ЭЭ путём сравнения его эффективности с другими методами искусственного интеллекта – нечёткой логикой, СМРЧ, ГА и МА. В результате верификации было установлено, что применение МАИК позволяет получить аналогичные результаты.

3. При моделировании проблема реконфигурации РС рассматривалась как проблема сложной многокритериальной частично целочисленной комбинаторной нелинейной оптимизации с заданными ограничениями в виде равенств и неравенств, поскольку при этом учитывались такие критерии, как максимальное сниже-

ние потерь активной мощности, сохранение напряжений в узлах сети в заранее установленных пределах, отсутствие перегрузки по току в ветвях РС, сохранение радиальной структуры РС и отсутствие отключенных нагрузок.

4. Представляется целесообразным применить МАИК для оптимизации конфигурации реальной разветвлённой РС с большим количеством узлов.

### Библиографический список

1. Atashpaz-Gargari, E. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition [Text] / E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas // Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007). – 25-28 September 2007. – Singapore. – P. 4661–4667.
2. Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the Imperialist Competitive Algorithm [Text] / S. Nazari-Shirkouhi, H. Eivazy, R. Ghodsi, K. Rezaie, E. Atashpaz-Gargari // Expert Systems with Applications. – 2010. – Vol. 37. – P. 7615–7626.
3. A new improved adaptive imperialist competitive algorithm to solve the reconfiguration problem of distribution systems for loss reduction and voltage profile improvement [Text] / S. H. Mirhoseini, S. M. Hosseini, M. Ghanbari, M. Ahmadi // Electrical Power and Energy Systems. – 2014. – Vol. 55. – P. 128–143.

Таблица 1

### Результаты верификации МАИК

| Тестовая схема IEEE | Метод оптимизации    | Нормально разомкнутые коммутационные аппараты |                      | Снижение потерь, % |
|---------------------|----------------------|---|----------------------|--------------------|
|                     |                      | Первоначальная конфигурация                   | После реконфигурации |                    |
| 33-узловая          | ГА [11, 12]          | 33, 34, 35, 36, 37                            | 7, 9, 14, 32, 37     | 31                 |
|                     | МА [13]              |   | 7, 9, 14, 28, 32     |                    |
|                     | СМРЧ [14]            |   | 7, 9, 14, 32, 37     |                    |
|                     | МАИК                 |   | 7, 9, 14, 32, 37     |                    |
| 69-узловая          | ГА [12]              | 69, 70, 71, 72, 73                            | 14, 56, 61, 69, 70   | 56                 |
|                     | МА [15]              |   | 12, 55, 61, 69, 70   |                    |
|                     | Нечёткая логика [16] |   | 14, 56, 63, 69, 70   |                    |
|                     | СМРЧ [14]            |   | 14, 56, 63, 69, 70   |                    |
|                     | МАИК                 |   | 14, 57, 61, 69, 70   |                    |



4. Tolabi, H. B. Multi-objective reconfiguration of distribution systems using imperialist competitive algorithm and graph theory [Text] / H. B. Tolabi, M. H. Moradi // Technical Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2013. – Vol. 3. – No. 6. – P. 511 – 518.
5. Conductor size selection in planning of radial distribution systems for productivity improvement using imperialist competitive algorithm [Text] / M. M. Legha, R. A. Sangrood, A. Z. Raeiszadeh, M. M. Legha // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). – 2013. – Vol. 5. – No. 2. – P. 65 – 69.
6. Simultaneous network reconfiguration with distributed generation sizing and tap changer adjustment for power loss reduction using imperialist competitive algorithm [Text] / G. Ing Koong, H. Mokhlis, J. J. Jamian, H. A. Illias, W. M. Dahalan, M. M. Aman // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2018. – Vol. 43. – No. 6. – P. 2779 – 2792.
7. Kargar, A. Reconfiguration of distribution systems with distributed generators based on Imperialist Competitive Algorithm [Text] / A. Kargar, V. Maleki // Proc. 17<sup>th</sup> Conference on Electrical Power Distribution. – 2-3 May 2012. – Tehran (Iran). – P. 1–5.
8. Jazebi, S. Distribution network reconfiguration in the presence of harmonic loads: optimization techniques and analysis [Text] / S. Jazebi, M. M. Hadji, R. A. Naghizadeh // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2014. – Vol. 5. – No. 4. – P. 1929 – 1937.
9. Fault-reconfiguration strategy of smart distribution network with distribution generators [Text] / F. Tang, J. Jia, D. Liu, Q. Liao, Z. Zhou // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2018. – Vol. 28. – No. 2. – P. 1 – 13.
10. Optimum network reconfiguration to improve power quality and reliability in distribution system [Text] / A. Bashardoust, M. Farrokhi, A. Y. Fard, A. Safari, E. Mokhtarpour // International Journal of Grid and Distributed Computing. – 2016. – Vol. 9. – No. 4. – P. 101–110.
11. 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.
12. Raut, U. Power distribution network reconfiguration for loss minimization using a new graph theory based genetic algorithm [Text] / U. Raut, S. Mishra // Proc. IEEE Calcutta Conference (CALCON 2017). – 2-3 December 2017. – Calcutta (India). – P. 1 – 5.
13. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators [Text] / Y.-K. Wu, C.-Y. Lee, L.-C. Liu, S.-H. Tsai // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. – No. 3. – P. 1678 – 1685.
14. Khalil, T. M. Reconfiguration for loss reduction of distribution systems using selective particle swarm optimization [Text] / T. M. Khalil, A. V. Gorpnich // International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering (IJMSE). – 2012. – Vol. 3. – No. 6. – P. 16–21.
15. Ghorbani, M. A. Application of Ant Colony System algorithm to distribution networks reconfiguration for loss reduction [Text] / M. A. Ghorbani, S. H. Hosseinian, B. Vahidi // Proc. 11<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. – 22-24 May 2008. – Brasov (Romania). – P. 1–5.
16. 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.

**Ключові слова:** модифікований алгоритм імперіалістичної конкуренції, реконфігурація розподільчої мережі, зниження втрат активної потужності, багатокритеріальна частково цілочислова комбінаторна нелінійна оптимізація.

**Ключевые слова:** модифицированный алгоритм империалистической конкуренции, реконфигурация распределительной сети, снижение потерь активной мощности, многокритериальная частично целочисленная комбинаторная нелинейная оптимизация.

**Keywords:** modified imperialist competitive algorithm, distribution network reconfiguration, active power losses reduction, multi-objective mixed-integer combinatorial nonlinear optimization.

**Рецензенты:**

д.т.н., проф. А. Б. Бойник,  
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк.

Поступила в редколлегию 17.04.2018.  
Принята к печати 26.04.2018.