

УДК 620.91

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Ф. Р. Исмагилов¹, И. Х. Хайруллин², В. Е. Вавилов³, А. М. Якупов⁴

¹ismagilov137@gmail.com, ²irekhhayrullin@yandex.com, ³s2_88@mail.ru, ⁴aynurpov@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 12.03.2018

Аннотация. Предлагается применение генетического алгоритма в автоматизированном проектировании распределительных электрических сетей с распределенными источниками генерации. Применение генетического алгоритма позволяет найти оптимальную по капитальным затратам и потерям в сети конфигурацию сети с определенными сечениями межзловых связей и с выбранными мощностями источников распределенной генерации. В целевой функции методики оптимизированного проектирования учитываются капитальные и эксплуатационные затраты, качество электрической энергии и надежность.

Ключевые слова: генетический алгоритм; распределенная генерация; оптимизация; проектирование; микротурбины; метод Гаусса; расчет режимов; капитальные затраты; математическая модель; надежность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес научного сообщества привлекает проблема распределенной генерации. Этому посвящено много исследований по различным аспектам: одни работы связаны с оптимальным расположением источников генерации [1], другие исследуют интеграцию распределенной генерации к энергосистеме [2]. При поиске оптимального расположения учитывают различные критерии оптимизации: потери в сетях, уровни напряжения, капитальные затраты.

На данный момент существуют различные методики проектирования для систем электроснабжения, которые реализованы во множестве программных комплексов (ПК), такие как PSS Sincal, или ПК Homer PRO [3], который является одним из лидеров в разработке решений для распределенной генерации.

ПК HOMER Pro служит для оптимизации схем электроснабжения для всех видов потребителей, от сельских источников и

островных коммунальных услуг до связанных с сетью кампусов и военных баз. Данный ПК может работать с большинством известных и разработанных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ): солнечные электростанции (СЭС), ветроустановки (ВЭУ), миниТЭЦ, биогазовые установки, солнечные коллекторы, микроГЭС, водородные АКБ.

Тем не менее предлагаемые на рынке ПК не позволяют учесть комплексное проектирование с учетом межзловых связей, с комплексной оптимизацией потерь с выбором сечений. Поэтому решение задачи оптимизированного проектирования сети с источниками распределенной генерации является актуальной научно-технической задачей.

Такие задачи из-за того, что они содержат множество параметров, которые связаны с другими параметрами рассматриваемой системы, имеют нелинейную, сложную целевую функцию. Поэтому для решения таких задач целесообразно использование

эвристических алгоритмов. Одним из наиболее популярных в настоящее время является генетический алгоритм. Далее рассмотрим ее применение в рамках поставленной задачи для данной статьи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Выделим задачи, которые должна решать разрабатываемая методика оптимизированного проектирования:

- определение мощности и расположения источников распределенной генерации;
- определение конфигурации меж-узловых связей, а также определение их сечений;
- минимизация капитальных и эксплуатационных затрат;
- соблюдение показателей качества электрической энергии в допустимых пределах;
- повышение надежности.

Данная задача будет решаться для проектирования сети 10 кВ с известными нагрузками и с известными координатами (рис. 1). В качестве источников распределенной генерации рассматриваются микротурбины (МТ).

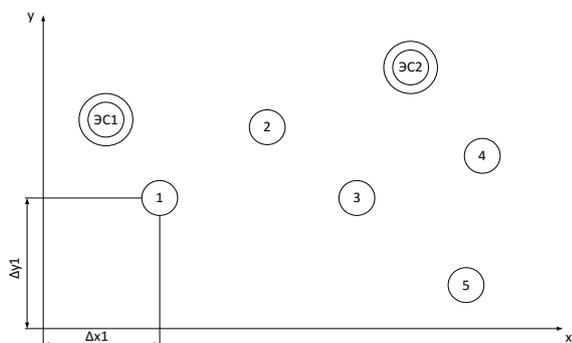


Рис. 1. Расположение нагрузок и точек подключения к энергосистеме

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ И ФУНКЦИИ ОГРАНИЧЕНИЯ

При постановке задачи было решено, что критерием оптимизации является минимизация капитальных и эксплуатационных затрат, повышение надежности и эксплуатационных затрат. Далее, по данным критериям составим целевую функцию.

$$f1 \cdot k_1 + f2 \cdot k_2 + f3 \cdot k_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $f1$ – параметр, отвечающий за капитальные и эксплуатационные затраты; $f2$ – параметр, отвечающий за потери в сети; $f3$ – параметр, отвечающий за показатели качества электрической энергии; k_1, k_2, k_3 – весовые коэффициенты, которые позволяют регулировать важность параметров $f1, f2, f3$. Параметры $f1, f2, f3$ ниже будут рассмотрены подробнее.

Параметр $f1$ отвечает за капитальные и эксплуатационные затраты:

$$f1 = p_n \cdot K + C, \quad (2)$$

где p_n – нормативный коэффициент эффективности, K – капитальные затраты, C – эксплуатационные затраты.

$$K = \sum_{i=1}^{i=n} K_{ВЛ,i} + K_{МТ,i} + K_{АКБ,i} + \sum_{j=1}^{j=n} K_{ВЛ,j-i} \quad (3)$$

где $K_{ВЛ,i}$ – стоимость строительства ВЛ от центра питания энергосистемы до i узла, $K_{ВЛ,j}$ – стоимость строительства ВЛ от узла j питания до i узла, $K_{МТ,i}$ – стоимость строительства МТ.

$$C = \sum_{i=1}^{i=n} (C_{МТ,i} P_{МТ,i} + C_{ВЛ,i} P_{ВЛ,i} + I_{ВЛ,j-i} + I_{ВЛ,i} + I_{МТ,i} + I_{пот}) \quad (4)$$

где $P_{ВЛ,i}$ – переток мощности от внешней энергосистемы в узел i ; $P_{МТ,i}$ – мощность микротурбины, установленной в узле i ; $C_{МТ,i}$ – удельная стоимость первичного энергоносителя на единицу мощности; $C_{ВЛ,i}$ – удельная стоимость электрической энергии получаемой с энергосистемы на единицу мощности; $I_{ВЛ,i}$ – эксплуатационные расходы ВЛ, связывающих ЭС с узлом i ; $I_{МТ,i}$ – эксплуатационные расходы МТ в узле i ; $I_{ВЛ,j-i}$ – эксплуатационные расходы ВЛ, связывающих узлы i и j ; $I_{пот}$ – потери в сети.

Параметр $f2$, отвечающий за потери определяется следующим образом:

$$f2 = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} |V_{i,t} - V_{j,t}|^2 |Y_{i,j}| \cos \alpha_{ij}, \quad (5)$$

где V_i – напряжение в узле i , V_j – напряжение в узле j , $Y_{i,j}$ – проводимость между узлом i и j , α_{ij} – угол линии, $C_{пот}$ – удельная

стоимость электрической энергии. f_2 вычисляется после расчета электрических режимов.

Параметр f_3 , отвечающий за показатели качества электрической энергии и надежность, определяется индексом стабильности напряжения (ИСН). ИСН определяется для каждого узла и зависит от перетоков мощности и определяется следующим образом:

$$\text{ИСН}_j = |V_i|^4 - 4 \left(P_j X_{i-j} - Q_j R_{i-j} \right)^2 - 4 \left(P_j R_{i-j} - Q_j X_{i-j} \right)^2 V_i^2, \quad (6)$$

где R_i, X_i – активное и реактивное сопротивление участка i , P_j, Q_j – активная и реактивная мощность узла j .

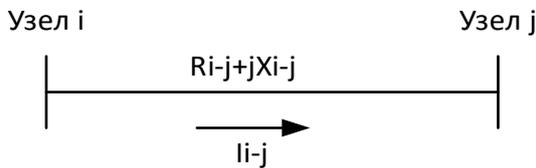


Рис. 2. Иллюстрация для определения ИСН

Параметр f_3 определяется следующим образом:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{i=n} \text{ИСН}_i. \quad (7)$$

Выше было проведено описание целевой функции, далее произведем описание функций ограничений.

Первой функцией ограничения введем ограничения по напряжению в соответствии требованиям качества электрической энергии:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}, \quad (8)$$

где V_{\min} и V_{\max} минимальное и максимальное допустимое напряжение узла.

Также вводятся ограничения по мощности генерации (задается пользователем):

$$P_{\text{дгmin}} \leq P_{\text{дг}} \leq P_{\text{дгmax}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{дгmin}}$ и $P_{\text{дгmax}}$ – минимальная и максимальная мощность МТ.

Введем ограничение по допустимому току:

$$I_{\text{доп}i-j} \leq I_{i-j}, \quad (10)$$

где $I_{\text{доп}i-j}$ – допустимый ток участка между узлом i и j , I_{i-j} – максимальный ток между узлом i и j .

По критерию надежности введем ограничение по ИСН:

$$\text{ИСН}_j > 0. \quad (11)$$

Далее рассмотрим ограничение по категории надежности потребителей. Для этого сначала введем матрицу межузловых связей, элементы которой принимают значения 0 и 1. Ниже показан пример матрицы межузловых связей:

$$|J| = \begin{vmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & 0 & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 0 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Количество строк и столбцов матрицы $|J|$ равняется количеству узлов и наличие в ячейке матрицы 1 говорит о наличии связи одного узла с другим, к примеру если $J_{12} = 1$ то это говорит о том, что между узлом 1 и 2 имеется связь, тогда J_{21} тоже равен 1. Диагональные элементы матрицы $|J|$ равны 0. Наличие матрицы связи удобно для реализации генетического алгоритма, который часто реализуется с использованием двоичных кодов, так называемых генов. Таким образом, конфигурация межузловых связей определяется матрицей межузловых связей. Но помимо задания межузловых связей, у каждого потребителя есть своя категория надежности и необходимо чтобы алгоритм понимал категорию надежности потребителей. Вопрос категории надежности потребителей решается функцией ограничения. Для этого необходимо, чтобы для потребителей III категории надежности была связь, хотя бы с одним узлом. Поэтому задаем функцию ограничения в виде суммы элементов столбцов или строк матрицы межузловых связей $|J|$. Ниже приведен реализации функции ограничения для j -го узла с третьей категорией надежности для которой достаточно, чтобы функция ограничения была равна или больше единицы:

$$\sum_{i=1}^n J_{i,j} \geq 1. \tag{13}$$

В случае когда категория потребителей узла выше III, необходимо, чтобы узел имел как минимум две связи с другими узлами. Поэтому задаем функцию ограничения для потребителей I и II категории суммой элементов строк или столбцов матрицы больше или равной двух. Для j -го узла функция ограничения для I и II категории надежности будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n J_{i,j} \geq 2. \tag{14}$$

Вводя такие функции ограничения, мы гарантируем, что каждый узел будет обеспечен питанием. А минимизации целевой функции приведет к тому, что потребители сети будут обеспечены питанием надежно с минимальным количеством связей. В случае когда в узле расположена генерация, при учете генерации функция ограничения по надежности будет выглядеть, как в (13).

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Для начала определим ввод конфигурации сети. Поэтому введем матрицу длин:

$$|L| = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1i} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{j1} & l_{j2} & \dots & l_{ji} \end{bmatrix}, \tag{15}$$

где количество строк и столбцов матрицы $|L|$ определяется количеством узлом, и ее элементы показывают связь определенного узла с другим узлом, например l_{12} и l_{21} показывает длину связи между первым и вторым узлом. Элементы $|L|$ которой определяются исходя из координат узлов (см. рис. 1):

$$l_{i,j} = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2}, \tag{16}$$

где x_i, x_j – координаты по оси x узлов i и j , y_i, y_j – координаты по оси y узлов i и j .

Конфигурация сети, таким образом, будет определяться матрицей межузловых связей $|J|$ и матрицей длин $|L|$.

Реализация ГА удобно проводить в двоичном коде, поэтому конфигурация сети в виде межузловых связей задана 1 и 0. Так как матрица межузловых связей зеркальная, то для скрещивания и мутации используются элементы выше диагональной матрицы, пример заполнения матрицы межузловых связей показан на рис. 3.

$$|J| = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Пример заполнения матрицы межузловых связей

Мощности МТ задается в виде матрицы МТ:

$$|MT| = \begin{bmatrix} MT_1 \\ \dots \\ MT_n \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Для использования матрицы МТ в ГА ее необходимо перевести в двоичный код.

Особь подаются в ГА, как показано на рис. 4.

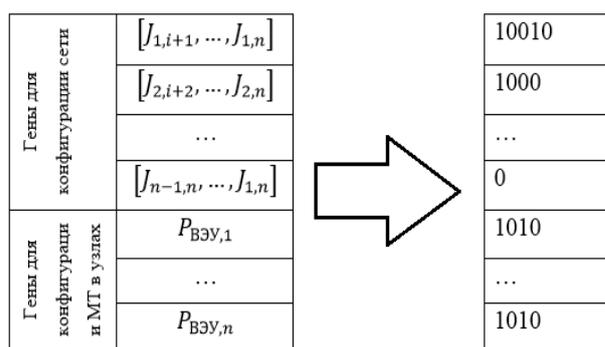


Рис. 4. Пример заполнения матрицы особи

Далее рассмотрим процессы скрещивания и мутации. После определения всех исходных данных и определения значения целевой функции необходимо задать изменения исходным вариантам таким образом, чтобы приблизиться к оптимальным капитальным затратам. Для этого ГА осуществ-

ляется функции естественного отбора, скрещивания и мутации. Рассмотрим их подробнее.

Процесс естественного отбора заключается в том, что в конкурентной борьбе особей выживает наиболее приспособленный. В нашем случае приспособленность особи определяется целевой функцией: чем меньше капитальные затраты на строительство ЭКГ, тем больше вероятность выживаемости. Процессом естественного отбора отсеиваются плохие с точки зрения оптимальности варианты.

После отбора наиболее оптимальных особей (вариантов) происходит процесс скрещивания. Иначе процесс скрещивания называется рекомбинацией. Процесс рекомбинации заключается в обмене участками хромосом между родителями. Рассмотрим процесс рекомбинации на примере матрицы нескольких особей. Например, скрестим хромосомы первой строки 100010 и 111100, показывающей межузловые связи с другими узлами. Для этого, выберем случайным образом точку разрыва хромосом ($[100][010]$), ($[111][100]$) и обменяем между хромосомами элементами после разрыва, получим ($[100][100]$), ($[111][010]$), рис. 5.

До скрещивания	
Особь 1	Особь 2
100010	111100
10000	10101
0100	0111
101	110
10	01
1	1
...	...
После скрещивания	
Потомок 1	Потомок 2
100100	111010
10101	10000
0111	0100
100	111
11	00
1	1
...	...

Рис. 5. Иллюстрация процесса скрещивания

Мутация – это изменения какого-либо гена потоков с определенной вероятностью. Выбирается вероятность мутации p и выбирается случайное число для каждой особи. В случае если p больше случайного числа

происходит инвертирование какого-либо гена, рис. 6.

До мутации	
Особь 1	Особь 2
100100	111010
10101	10000
0111	0100
100	111
11	00
1	1
...	...
После мутации	
Потомок 1	Потомок 2
100110	101010
10100	10001
0111	0100
101	110
11	01
1	1
...	...

Рис. 6. Иллюстрация процесса мутации

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ

Для выбора сечений межузловых связей и расчета потерь осуществляется расчет режимов. Алгоритмической основой для расчета режимов электрической сети по линейным узловым уравнениям принимается метод Гаусса, который отличается быстрой сходимостью и точностью. В расчете режимов осуществляется два режима расчета:

- когда генерация МТ минимальная (минимальный режим);
- когда генерация МТ максимальная (максимальный режим).

Для выбора сечений межузловых связей используется принцип $n-1$. В цикле $n-1$ осуществляется критерий надежности при отказе одного элемента сети. Для этого в матрице $|J|$ по очереди обращается в ноль по одному ненулевому элементу. Также для цикла $n-1$ вводится проверка количества суммы строк и столбцов отключаемого элемента, в том случае, если количество строк или столбцов равно 1, то отключение элемента не происходит.

Далее происходит определение матрицы проводимостей:

$$|b1| = \begin{vmatrix} |B1| & |G1| \\ |G1| & -B1 \end{vmatrix}, \quad (17)$$

где $|B1|$ – матрица реактивной проводимости элементы, элементы проводимости ветвей которой находятся как:

$$B1(i,j) = \frac{-x(i,j)}{r(i,j)^2 + x(i,j)^2}; \quad (18)$$

$|G1|$ – матрица активной проводимости элементы, элементы проводимости ветвей которой находятся как:

$$G1(i,j) = \frac{-r(i,j)}{r(i,j)^2 + x(i,j)^2}, \quad (19)$$

Для диагональных элементов матриц $B1(i,j)$, $G1(i,j)$ принимается отрицательная сумма проводимостей ветвей.

Для узлов связанных с энергосистемой определяются элементы матрицы $|yb|$, где верхние половина элементов это взаимные активные проводимости с базисным узлом, нижние половина – взаимные реактивные проводимости.

После определения матрицы проводимостей $|b1|$. Решаются итерационным методом уравнения напряжения методом Гаусса:

$$|U1^{(i+1)}| = |b1|^{-1} \cdot [\sqrt{3} \cdot |I| U^i] - |y_b| \cdot U_b, \quad (20)$$

где U_b – базисное напряжение.

После определения узловых напряжений методом Гаусса, определяются максимальные токи в ветвях для случаев по критерию $n-1$ в максимальном и минимальном режиме, тем самым учитываются все возможные режимы, что обеспечивает правильный выбор сечений межузловых связей. Это необходимо для правильного расчета капитальных затрат особей. Сечения проводников определяются по условию:

$$I_{\text{доп}} > I_{\text{max } i,j}, \quad (21)$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток выбираемого кабеля, $I_{\text{max } i,j}$ – максимальный ток участка между узлами i и j , полученный по критерию $n-1$.

После выбора сечений сопротивления межузловых связей пересчитываются до тех пор, пока сечения при каждой итерации не-рестанут меняться.

Таким образом, методика оптимизированного проектирования включает в себя ГА, расчет режимов, потерь и выбор сече-

ний. На рис. 7 показан алгоритм работы методики оптимизированного проектирования.

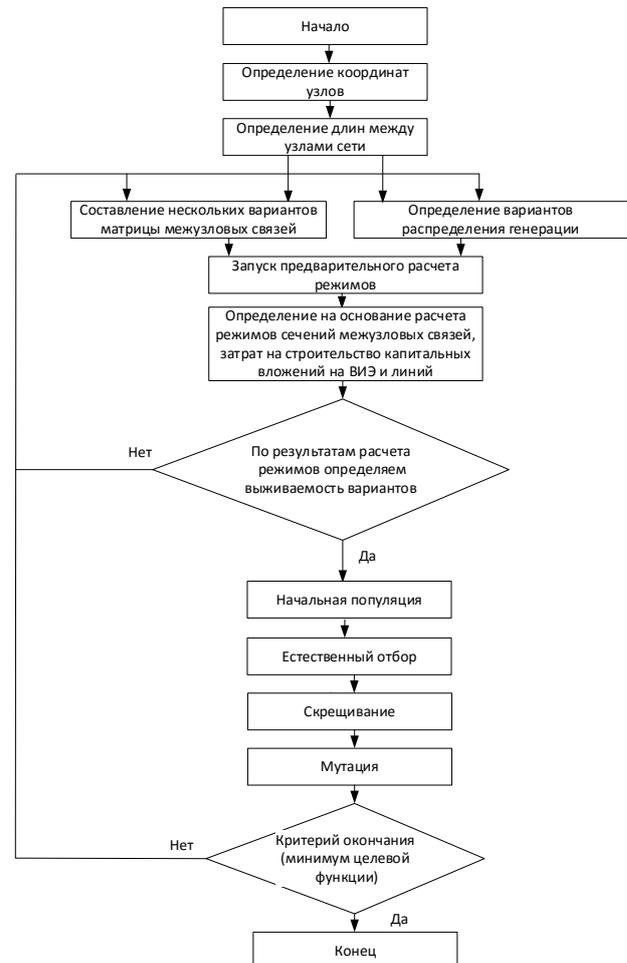


Рис. 7. Алгоритм работы методики оптимизированного проектирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе авторами предлагается методика оптимизированного проектирования, основанная на применении генетического алгоритма и расчета режимов по критерию надежности $n-1$. Предложенная методика в целевой функции минимизирует капитальные затраты и потери, повышает надежность и качество электрической энергии. Результатом работы методики является конфигурация сети и распределение мощности генерации по узлам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atia R., Yamada N. Distributed Renewable Generation and Storage System Sizing Based on Smart Dispatch of Microgrids. *Energies*. 2016, 9, 176. [R. Atia, and N. Yamada, "Distributed Renewable Generation and Storage System Sizing

Based on Smart Dispatch of Microgrids". Energies. 2016, 9, 176.]

2. **Guerrero J. M., Vasquez J. C., Matas J., Viciña L. G., Castilla M.** Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization. IEEE Trans. Ind. Electron. 2011, 58, 158–172. [J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. Viciña, M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization". IEEE Trans. Ind. Electron. 2011, 58, 158–172.]

3. Homer energy [Электронный ресурс]. URL: https://www.homerenergy.com/HOMER_pro.html. (дата обращения 06.08.2017). [Homer energy [Online]. Available: https://www.homerenergy.com/HOMER_pro.html]

4. **Тарасовская Н. Е., Оразалина Г. А., Оразбаева А. А.** Методическая классификация генетических задач по алгоритму решения. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современное общество, образование и наука», 2015, стр.148-150. [N. E. Tarasovskaya, G. A. Orazlina, A. A. Orazbaeva, "Methodical classification of genetic problems by the decision algorithm," (in Russian). Collection of proceedings on materials of the International Scientific and Practical Conference "Modern Society, Education and Science", 2015, p.148-150]

5. **Минегалиева М. М., Набиев И. И.** Исследование влияния размерности популяции в генетическом алгоритме на эффективность решения задач оптимизации. Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции в 4 т. «Поколение будущего: взгляд молодых ученых – 2015», 2015, с. 56 – 68. [M. M. Minigaleeva, I. I. Nabiev, "Investigation of the influence of population size in a genetic algorithm on the efficiency of solving optimization problems", (in Russian). Collection of scientific articles of the 4th International Youth Scientific Conference in 4 volumes. "Generation of the Future: A View of Young Scientists - 2015", 2015, pp.56-68]

ОБ АВТОРАХ

ИСМАГИЛОВ Флюр Рашитович, д-р техн. наук, проф., зав.каф.э/мех. УГАТУ. Дипл.инженер э/мех.(УАИ, 1973). Иссл.в обл. э/мех. преобразователей энергии.

ХАЙРУЛЛИН Ирек Ханифович, д-р техн. наук, проф. каф. э/мех. УГАТУ. Дипл.инженер э/мех.(ИЭИ, 1963). Иссл.в обл. э/мех. преобразователей энергии.

ВАВИЛОВ Вячеслав Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент каф. э/мех. УГАТУ. Иссл. в обл. э/мех. преобразователей энергии.

ЯКУПОВ Айнура Махматович, асп..каф.э/мех. УГАТУ. Дипл.инженер ЭСИС.(УГАТУ, 2014). Иссл.в обл. возобновляемых источников энергии.

METADATA

Title: Using the genetic algorithm for optimized designing of electric network with distributed generation

Authors: F. R. Ismagilov¹, I. N. Hayrullin², V. E. Vavilov³, A. M. Yakupov⁴

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ismagilov137@gmail.com,
²irek khayrullin@yandex.com, ³ s2_88@mail.ru,
⁴aynurpov@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 1 (79), pp. 106-112, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In this article, authors propose the use of a genetic algorithm in the automated design of distribution electrical networks with distributed sources of generation. The use of the genetic algorithm allows finding the network configuration optimal with respect to capital costs and network losses, with certain cross-sections of inter-node connections and with the selected capacities of sources of distributed generation. The objective function of the optimized design methodology takes into account capital and operating costs, the quality of electrical energy and reliability.

Key words: Genetic algorithm; distributed generation; optimized design technique.

About authors:

ISMAGILOV, Flur Rashitovich, doctor of technical Sciences, Professor, the head of dept. of electromechanics USATU.

HAYRULLIN, Irek Khanifovich, doctor of technical Sciences, Professor of dept. of electromechanics USATU.

VAVILOV, Vacheslav Evgenievich, candidate of technical Sciences, Lecturer of dept. of electromechanics USATU.

YAKUPOV, Aynur Machmutovich, post-graduate student of dept. of electromechanics USATU.